





Forschungsbericht

Smart Skin -Salzburger Multifunktionsfassade

Simon Hinterseer, BSc; Dipl.-Ing. Dr.techn. Maximilian Neusser Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bednar **Technische Universität Wien Institut für Hochbau und Technologie**

DI(FH) DI Hermann Huber; FH-Prof. DI (FH) Dr. Thomas Schnabel Benjamin Portugaller, BSc; DI Markus Leeb Mag. (FH) DI Markus Karnutsch, BSc; Matthias Gnigler, BSc FH-Prof. DI DI Dr. Thomas Reiter Fachhochschule Salzburg Holz und Biogene Technologien Smart Building & Smart City

Projekt- und Förderpartner:

Paul Schweizer Architekten Innova Holz GmbH VELOX Werk GmbH Isocell GmbH Felbermayr Bau GmbH & Co KG G.S. Georg Stemeseder Installationen Anton Schaber Gebäude- und Regeltechnik GmbH KE KELIT Kunststoffwerk GmbH., NL Salzburg Raumklima Planungsgesellschaft GmbH

Das Forschungsprojekt wurde teilweise aus Fördermitteln des Landes Salzburg finanziert.



Technik Gesundheit Medien

ERGEBNISBERICHT

SMART SKIN-

SALZBURGER MULTIFUNKTIONSFASSADE





FH Salzburg Holztechnologie & Holzbau



TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN Vienna University of Technology



ISBN 978-3-200-06200-9

SMART SKIN-

SALZBURGER MULTIFUNKTIONSFASSADE

Simon Hinterseer, BSc; Dipl.-Ing. Dr.techn. Maximilian Neusser Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bednar Technische Universität Wien Institut für Hochbau und Technologie

DI(FH) DI Hermann Huber; FH-Prof. DI (FH) Dr. Thomas Schnabel Benjamin Portugaller, BSc; DI Markus Leeb Mag. (FH) DI Markus Karnutsch, BSc; Matthias Gnigler, BSc FH-Prof. DI DI Dr. Thomas Reiter Fachhochschule Salzburg Holz und Biogene Technologien Smart Building & Smart City

Danke an alle Projekt- und Förderpartner:

Paul Schweizer Architekten Innova Holz GmbH VELOX Werk Gmbh Isocell GmbH Felbermayr Bau GmbH & Co KG G.S. Georg Stemeseder Installationen Anton Schaber Gebäude- und Regeltechnik GmbH. KE KELIT Kunststoffwerk GmbH., NL Salzburg Raumklima Planungsgesellschaft GmbH

Das Forschungsprojekt "Smart Skin – Salzburger Multifunktionsfassade" wurde teilweise aus Fördermitteln des Landes Salzburg finanziert.

Vorwort

Aufgabe und Ziel der Arbeit:

Der vorliegende Forschungsbericht "Smart Skin – Salzburger Multifunktionsfassade" soll einen Einblick in die Gebäudetechnik und bauphysikalisch relevante Themen von thermisch aktivierten Vorhangfassaden geben und die Ergebnisse des Forschungsprojektes präsentieren.

Die Aktivierung von Bauteilen aus Beton ist detailliert erforscht und entspricht heute dem Stand der Technik. In den letzten Jahren sind zahlreiche Bauprojekte mit aktivierten Betonelementen umgesetzt worden. Die funktionale Einbindung von Holz bei der Bauteilaktivierung ist derzeit noch nicht umgesetzt und nicht ausreichend erforscht worden. Das Forschungsprojekt "Smart Skin – Salzburger Multifunktionsfassade" befasst sich mit dem Zusammenspiel von Holz und Beton bei möglichen Anwendungen der Bauteilaktivierung. Der Baustoff Holz übernimmt im Projekt die statischen Funktionen, der Baustoff Beton rein die Funktion der Wärmeverteilung und -speicherung. Mit dieser Studie wurden die ersten Grundlagen für diese Baustoffkombination geschaffen und parallel dazu wurde eine erste Anwendung in der thermischen Sanie-rung von Bestandsgebäuden umgesetzt.

Gemeinsam mit den Kooperationspartnern wurde ein neuartiges Fassadensystem unter wissenschaftlicher Begleitung konzipiert, geplant und umgesetzt. Der entwickelte Prototyp fasst die Funktionen Heizen, Dämmen und Schallschutz in einem Element zusammen und kann nachträglich in Gebäude integriert werden und somit eignet sich das Fassadensystem auch für Gebäudesanierungen.

Die angeführten Mitarbeiter der Fachhochschule Salzburg GmbH an diesem Projekt waren bei den gesamten Projekttätigkeiten und Entscheidungen im Entwicklungsprozess eingebunden, haben die Arbeiten wissenschaftlich begleitet und wurden durch die beteiligten Unternehmen unterstützt.

Nach der Entwicklung des Fassadensystems wurde ein Prototyp auf einer bestehenden Außenwand mit einer Fläche von 23,39 m² an einem Wohngebäude an der Salzachtalstraße 32-34 in 5400 Hallein unter Realbedingungen getestet. Die vorgefertigten Holzbauteile, inklusive Rohrleitungen und Anschlüsse für die thermische Aktivierung wurden nach den erforderlichen Arbeiten zum Einbau der Messsensorik zur Baustelle transportiert und montiert. Nach der Montage der Elemente und dem Einbauen der Messsensoren wurde der Hohlraum zwischen den Fassadenelementen und der Bestandswand, in dem die Heizleitungen angeordnet waren, mit Beton hinterfüllt. Anschließend wurden die Rohrleitungen an das vorgesehene Heizsystem angeschlossen, die Wärmedämmung eingebracht und die Fassadenbekleidung aus Lärmschutzelementen montiert. Die Ergebnisse der thermischen und hygrischen Untersuchung dieses Fassadenelements sind im ersten Teil detailliert aufgeführt. Die verwendeten Methoden und Gerätschaften entsprachen dem aktuellen Stand der Technik. Die Eigenschaften und das Verhalten des Prototyps wurden über einen Zeitraum von 2 Monaten unter Realbedingungen untersucht. Basierend auf den aufgezeichneten Daten wurden nummerische Simulationen durchgeführt, um eine Optimierung des Fassadensystems sowie des Heizsystems zu erreichen.

Das Fassadensystem wurde einer akustischen Analyse am Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz an der Technischen Universität Wien unterzogen. Durch Variationen des Schichtaufbaus sowohl in den Stärken der Schichten als auch den Einsatz unterschiedlicher Werkstoffe für die Fassadenbekleidung wurde eine Optimierung der Schallabsorptionseigenschaften des Fassadensystems durchgeführt. Bestehende Lärmschutzprodukte und Fassadenbekleidungen wurden auf unterschiedlichen Grundkörpern montiert und im Hallraum geprüft. Die Ergebnisse der Schalladsorptionsmessungen wurden miteinander verglichen, um die optimale Kombination aus Grundkörper und Bekleidung zu ermitteln.

Eine holztechnologische Bewertung des entwickelten Fassadenprototyps im Zusammenspiel zwischen Holz und Beton erfolgte nach dem Abschluss der Datenerhebung. Vor dem Rückbau des Prototyps wurden die äußerste Fassadenschicht mit dem Lärmschutzelement, die Hinterlüftung und die Dämmebene entfernt. Anschließend wurde ein Probenkörper aus dem tragenden Holzelement, das in Kontakt mit dem Hinterfüllbeton stand, entnommen. Die Probenentnahme erfolgte über den gesamten Holzquerschnitt des vierschichtigen Elements. Die Holzfeuchte und die Holzfeuchteverteilung, sowie die pH-Wertänderung wurden bestimmt, um eine Risikoabschätzung für den Einsatz von Holz in diesem feuchtesensitiven Bereich – hohe Feuchtebelastung beim Einbringen des Betons - zu ermöglichen. Abschließend wurde noch ein Beschichtungssystem für den gewählten Fassadenprototyp auf seine Eignung für geprüft. Dies geschah vor allem in Hinblick auf die Möglichkeit der Fassadengestaltung, um ästhetischen Ansprüchen bei der Umsetzung Rechnung zu tragen.

Basierend auf den Ergebnissen dieses Projektes und den Erfahrungen der Prototypenentwicklung erfolgte eine Umsetzung des entwickelten Fassadensystems mit kombinierter Holz- und Betonbauteilaktivierung bei einer thermischen Gebäudesanierung eines viergeschossigen Wohngebäudes an der Salzachtalstraße 32-34 in 5400 Hallein.

Die Autoren danken dem Konsortium für die Beauftragung der wissenschaftlichen Begleitung, sowie der Möglichkeit bei der Entwicklung und Umsetzung des Systems mitzuwirken.

Kapitelübersicht

Einleitung	1
Thermische und hygrische Untersuchung der SMF- FH-Salzburg	3
Akustische Untersuchung der SMF – TU Wien2	7
Untersuchung von Holzfeuchte und pH-Werte, Beschichtungsversuche – FH- Salzburg	3
Zusammenfassung der Ergebnisse	9

Einleitung

Das Ziel des Forschungsprojektes "Smart-Skin Salzburger Multifunktionsfassade" ist die Entwicklung eines Prototyps für die Fassade des Gebäudes Salzachtalstraße 32-34 in Hallein. Gemeinsam mit den Kooperationspartnern wurde die neuartige Fassade unter wissenschaftlicher Begleitung konzipiert, geplant und umgesetzt. Der Prototyp fasst die Funktionen Heizen, Dämmen und Schallschutz in einem Element zusammen.

Dieser Ergebnisbericht liefert, aufgeteilt in unterschiedlichen Abschnitten, Erläuterungen zu den Themen

- thermische und hygrische Funktionalität
- akustische Funktionalität
- Holzfeuchte, pH-Werte und Beschichtungsversuche

der Multifunktionsfassade.

Die einzelnen Abschnitte sind unabhängig voneinander entstanden, und wurden zur Erstellung dieses Berichtes aneinandergefügt. Sie stellen also einzelne, in sich abgeschlossene Kurzberichte dar.

Am Ende des Berichtes werden die Ergebnisse zum Zwecke der Übersichtlichkeit zusammengefasst präsentiert.



Thermische und hygrische

Untersuchung der SMF



Abbildung 1: Südwest-Ansicht des Prototypen in der Salzachtalstraße 32/34, Hallein (Quelle: FH Salzburg)

Benjamin Portugaller, BSc DI Markus Leeb Mag.(FH) DI Markus Karnutsch, BSc; Matthias Gnigler, BSc FH-Prof. DI DI Dr. Thomas Reiter

Fachhochschule Salzburg Smart Building & Smart City

> Technik Gesundheit Medien

Inhaltsverzeichnis

1.	Ziel	.5
2.	Objektbeschreibung / Randparameter / Gebäudedaten	.5
3.	Prototyp	6
	3.1. Fühler	9
	3.2. Heizkreis und Regelung	9
	3.3. Konditionierung der Wohnung	10
4.	Ergebnisse	12
	4.1. Beheizung, Temperaturen und Massenströme	12
	4.2. Ergebnisse Bauteilmessung	14
	4.3. Spezifische Heizleistung des Systems	17
5.	Simulation und Validierung des Versuchsaufbaues	18
	5.1. Validierung mittels Gebäudesimulation	18
	5.2. Validierung mittels Bauteilsimulation	19
6.	Conclusio und Ausblick	23
7.	Literaturhinweis	25

1. Ziel

Das Ziel des Projektes ist der Nachweis der thermischen und hygrischen Funktion der Salzburger Multifunktionsfassade. Dieser Teil des Ergebnisberichts befasst sich mit der thermischen und hygrischen Validierung der Messung inklusive Auswertung der Fühlerdaten, die im Rahmen der Messung des Prototyps von Februar bis April 2018 gesammelt werden konnten. Es werden die Temperatur- und Feuchteverläufe im Messraum und in den Aufbauten sowie weitere Details bezüglich Heizwassertemperaturen und der resultierenden Heizlast betrachtet.

2. Objektbeschreibung / Randparameter / Gebäudedaten

Das betrachtete Gebäude befindet sich in der Salzachtalstraße 32-34 der Stadt Hallein. Der spezifische Heizwärmebedarf des Bestandsgebäudes im unsanierten Zustand beträgt 136,2 kWh/m²a (Karnutsch et al. Anhang 3 S.16). Die Außenwand besteht aus Ziegel (38 cm); beidseitig verputzt kommt dieser auf eine Gesamtstärke von 43 cm. Im Rahmen der Sanierungsarbeiten wurde der Innenputz entfernt, damit beträgt die Dicke der Bestandswand zum Zeitpunkt der Sanierung 41 cm.

Die für die Messung relevante Wohnung befindet sich im Erdgeschoß an der Südostseite des Gebäudes. Wie in Abbildung 2 ersichtlich wurde als Messraum das mittlere der drei Schlafzimmer ausgewählt.

Dieser Raum wurde ausgewählt, da die umliegenden Räume auf die gleiche Temperatur konditioniert werden können. Außerdem stellt er in Bezug auf die Heizlast einen kritischen Raum des Gebäudes aufgrund des geringen Verhältnisses zwischen Fassadenheizfläche und Raumfläche dar. Folglich kann bei funktionierender Beheizung dieses Raumes von außen ein Rückschluss auf die Beheizung des gesamten Gebäudes gezogen werden.



Abbildung 2: Grundriss der Wohnung. (Quelle: FH Salzburg)

3. Prototyp

Der Prototyp wurde gemeinsam mit den Auftraggebern entwickelt. Die beteiligten Firmen stellten Materialien wie Schallabsorptionspaneele, Verrohrung, Dämmstoff und Holzkonstruktion zur Verfügung und waren maßgeblich an der Erstellung, Montage bzw. Installation des Prototyps beteiligt.

Energetisch relevante Bauteile des Prototyps umfassen die Verbundholzplatte (10 cm), Isocell Zellulose eingeblasen (16 cm) und 2,4 cm Holzschalung, sowie eine Betonschicht (8 cm), die zwischen Prototyp und Bestandsmauerwerk verfüllt wurde. In dieser Schicht liegen die KeKelit KELOX Mehrschichtverbundrohr M/multilayer pipe M 20x2,25 mm für die Außenwandaktivierung. Außenseitig befindet sich eine Hinterlüftungsebene (3 cm) und die schallabsorbierenden Velox Paneele (5-8 cm).

	38 8 16 3				
		Tabelle 1: Ma mittels Gebä	aterialkennwerte udesimulationss	für die Validieru oftware IDA ICE	ung
		Dicke	Lambda-	Errechnete	Dichte
		d [m]	werte Da-	Lamda-	ρ [kg/m3]
		[111]	λ	λ	[Kg/III*]
			[W/mK]	[W/mK]	
1.	Vollziegelmauerwerk	0,38	0,65	0,83	1500
2.	Kalkzementputz	0,03	0,7	0,7	1600
З.	Verfüllmörtel	0,08	0,9-1,4	0,5	1970
4.	Brettsperrholz verdübelt	0,1	0,1	0,04	475
5.	Riegel	0,16	0,12	0,12	475
	dazw. Isocell -Einblasdämmung	0,16	0,038	0,038	54
6.	Schalung	0,024	0,12	0,12	475
7.	Isocell OMEGA Winddichtung	0,0006	0,22	0,22	170
8.	Lattung	0,03			
	dazw. Luft				
9.	Velox Schallabsorptionsplatte	0,05-0,08			

Das Büro für Bauphysik unter der Leitung von Ao. Univ. Prof. i. R. Dipl.-Ing. Dr. Klaus Kreč erstellte unter Zuhilfenahme des gemessenen Temperatur- und Feuchteverlaufs detaillierte Berechnungen zu den bauphysikalischen Eigenschaften der einzelnen Baustoffe. Hier zeigten sich einige Abweichungen (in rot markiert, siehe Tabelle 1) zu den vorab angenommenen Materialkennwerten:

Die mittlere Wärmeleitfähigkeit des Vollziegelmauerwerks ist in der Praxis mit 0,83 W/m.K relativ hoch.

Die Wärmeleitfähigkeit des Verfüllmörtels von 0,9 bis 1,4 W/m.K kann aus den Messungen ebenfalls nicht bestätigt werden. Die Berechnungen ergeben hier einen Wert von 0,5 W/m.K. Dies wird allerdings nicht auf den Verfüllmörtel selbst, sondern auf Lufteinschlüsse zurückgeführt.

Als weitere Auffälligkeit wurde eine verringerte Leitfähigkeit der verdübelten Sperrholzplatte errechnet. Dies ist möglicherweise durch Lufteinschlüsse zu erklären, da diese Art von Sperrholzplatten nicht vollflächig verleimt sind.

In den Validierungsberechnungen mit der Bauteilsimulationssoftware Wufi Pro wurden aufgrund der vorher erwähnten Lufteinschlüsse die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ , wie in Tabelle 2 dargestellt, nach unten korrigiert. In dieser Bauteilsimulationssoftware können keine Feuchtetransportprozesse infolge von Lufteinschlüssen in Materialien berechnet bzw. berücksichtigt werden. Weitere Details zu den Materialkennwerten folgen in Kapitel 5 – Simulation und Validierung des Versuchsaufbaus.

		Dicke d	µ-Werte Datenblatt	Verwendete µ-Werte	Dichte ρ
		[m]	Datenbank	μ [-]	[kg/m³]
			μ [-]		
1.	Vollziegelmauerwerk	0,38	15	15	1500
2.	Kalkzementputz	0,03	50	50	1600
З.	Verfüllmörtel	0,08	15-35	10	1970
4.	Brettsperrholz verdübelt	0,1	37	3	475
5.	Riegel				
	dazw. Isocell -Einblasdämmung	0,16	1,8	1	54
6.	Schalung	0,024	130	3	475
7.	Isocell OMEGA Winddichtung	0,0006	34	34	170
8.	Lattung	0,03			
	dazw. Luft				
9.	Velox Schallabsorptionsplatte	0,05-0,08			

Tabelle 2: Materialkennwerte für die Validierung mittels Bauteilsimulationssoftware Wufi Pro

Der Prototyp wurde als Element vorgefertigt und vor Ort mittels Stahlwinkel am Bestandsmauerwerk befestigt. Gemäß dieses Aufbaus wurden 5,97 m² Wandheizung (rot), 11,24 m² Randheizung (blau) und ein nicht aktivierter Bauteil für andere Forschungszwecke mit 6,18 m² hergestellt und am Testgebäude angebracht. (siehe Abbildung 4)



Abbildung 4: Südwest-Ansicht des Prototypen in der Salzachtalstraße 32/34 plus Darstellung der beheizten Zonen – rot: Wandheizung Untersuchungsraum; blau: Wandheizung Randzone, Hallein (Quelle: FH Salzburg)

3.1. Fühler



Abbildung 5: Fühlerpositionen im Bauteil

Die Bauteilfühler wurden durch Bohrlöcher in die Fassade eingesetzt und mit luftdichter Dichtmasse versiegelt. Zusätzlich wurde eine Luftdichtheitsmanschette über den Fühler gestülpt, um den Messraum einzugrenzen. Die Bauteilfühler messen die Feuchte und Temperatur des Mikroklimas an sechs Stellen im Bauteil (2-7 in Abbildung 5). Weiters wurden die Oberflächentemperaturen der Innen- und Außenoberfläche des energetisch relevanten Aufbaus aufgezeichnet (1 und 8).

Fühler:

E+E Elektronik EE071:

Bauteiltemperatur und Bauteilfeuchte

Innenklima und Außenklima (mit Strahlungsschutz E+E Elektronik HA010502)

Temperatur: Genauigkeit: ±0,1 °C bei 23 °C; Messbereich: -40...80 °C,

Feuchte: Genauigkeit: ±3 % rF (90...100 % rF); Messbereich: 0...100 % rF

Thermokon TF14/OF14:

Oberflächentemperatur am Bauteil Innen und Außen

Genauigkeit bei 21 °C: ± 1 %

Danfoss SonoMeter 30

Wärmemengenzähler VL/RL für Wand- und Randheizung

Wärmemenge: ± 4 % des kombinierten Wertes aus Temperaturen und Massenstrom.

Technische Alternative Globalsstrahungssensor (GBS01) Vertikal

Globalsstrahlung: Genauigkeit: $\pm 5 \%$ zzgl. ± 50 Watt, linearer Messbereich: 0...1,400 W/m²

3.2. Heizkreis und Regelung

Der Zwischenraum zwischen Bestandmauerwerk und Prototyp wurde nach Installation des Fassadenelementes mit Injektionsmörtel befüllt. Dieser hat eine Rohdichte von 1970 kg/m³, die Wärmeleitfähigkeit liegt in der Praxis bei 0,5 W/m.K (siehe Kapitel 3). In diesem Zwischenraum befindet sich der Heizkreis für die Aktivierung der Außenwand. Verlegeabstand der Heizschlangen zueinander beträgt idR. 20-25 cm. Es kamen KeKelit KELOX Mehrschichtverbun-

drohre M/multilayer pipe M 20x2,25 mm zur Anwendung, die im Rahmen der Vorfertigung bereits auf dem Holzmodul montiert wurden. Dabei wurden die Wand- und Randheizung getrennt. Die Wandheizung deckt das zum Messraum gehörende Wandstück ab, während die Randheizung das umgebende Mauerwerk temperiert um Wärmebrückenverlusten entgegen zu wirken. Die Randheizung sorgt somit dafür, dass keine Wärme über die Flanken entweichen kann. Mit dieser Vorgehensweise werden realistische und vergleichbare Bedingungen hergestellt. Beide Heizungssysteme wurden separat mit Wärmemengenzählern erfasst. Die Vorlauftemperatur wurde bei annähernd gleichem Volumenstrom außentemperaturabhängig geregelt. Die Vorlauftemperatur verläuft linear zwischen 35 C bei -15 C Außentemperatur und 20 C bei 20 °C Außentemperatur. Für die Regelung der Vorlauftemperatur nach Innentemperatur war der Messzeitraum zu kurz. Die Untersuchungen der Regelungsstrategien erfolgt innerhalb des Forschungsprojekts "Smart City Hallein - Wohnen findet Stadt!".

Trägheit des Systems

In einer thematisch sehr ähnlichen Bachelorarbeit (Portugaller, 2017, S. 24) wurde die Trägheit von derartigen Heizsystemen untersucht. Hier wurde detailliert betrachtet, wann nach einem Temperaturabfall unter den Sollwert diese wieder erreicht wird. Es zeigte sich, dass hier eine Verzögerung von 24 Stunden zum erneuten Erreichen des Sollwertes auftritt. Das Wissen um diese Wirkungsverzögerung ist vor allem für die Benutzer des Gebäudes relevant, um eine häufige Sollwertänderung und folglich direkte Auswirkungen auf den Komfort im Innenraum zu vermeiden.

3.3. Konditionierung der Wohnung

Um die Transmissionsverluste zu den Nachbarräumen zu eliminieren bzw. zu minimieren, wurde die gesamte Wohnung (ausgenommen Messraum) durch Heizkörper temperiert. Die Nebenräume wurden auf eine Temperatur von 21 °C bis 22 °C konditioniert, um nahezu adiabate Zustände zwischen Messraum und den Nachbarräumen zu erreichen. Die darüber liegende Wohnung ist bewohnt und konditioniert. Die Wärmeverluste/-gewinne zu diesen konditionierten Räumen wurden für die Auswertung als nicht vorhanden betrachtet. Die Zwischendecke zum darunterliegenden Keller wurde gedämmt und erreicht somit einen U-Wert von 0,26 W/m²K. Durch diese Decke treten Wärmeverluste auf, die einen großen Einfluss auf die Beheizbarkeit des Messraumes aufweisen.

Um ein natürliches Lüftungsverhalten durch die Bewohner zu simulieren, wurde die Wohnung während der Kernzeit der Messung (19.02.2018 bis 10.03.2018) wochentags zweimal täglich gelüftet. Die Berechnungen zur Lüftungsdauer wurde gemäß der ÖNORM EN 13465 durch-

Ergebnisbericht Salzburger Multifunktionsfassade Hallein

geführt. Die Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außenluft beeinflusst den Volumenstrom durch die geöffneten Fenster. Es wurde ein einfacher Luftwechsel je Lüftungsintervall errechnet. Es ergaben sich, abhängig von den Außentemperaturen, Lüftungszeiträume zwischen 200 und 400 Sekunden.

4. Ergebnisse

Die Daten hinsichtlich Temperierung und Beheizung in diesem Kapitel beziehen sich auf die kälteste aufgezeichnete Periode (25.02.2018 bis 03.03.2018) während für die Bauteilbetrachtung die gesamte Messdauer herangezogen wird (07.02.2018 bis 17.04.2014), da hier Rückschlüsse in Bezug auf die Austrocknung der Konstruktion gemacht werden.

Es wird nur die "Wandheizung" und nicht die "Randheizung" diskutiert. Die Randheizung ist für die Messung nicht relevant, da sie nur die Flankenverluste des Prototyps eliminiert.

4.1. Beheizung, Temperaturen und Massenströme

Über die gesamte Messdauer hinweg ist auffällig, dass die Temperaturspreizung sehr gering bleibt. Während der erwähnten Kälteperiode beträgt diese im Mittel 0,45 K, der Maximalwert liegt bei 0,91 K. Diese geringe Spreizung war beabsichtigt um eine nahezu konstante Temperatur im Bauteil gewährleisten zu können. Die mittlere Vorlauftemperatur beträgt 31,85 °C und überschreitet 36 °C während der Kälteperiode nicht (max. 35,65 °C). Der Massenstrom liegt durchschnittlicher bei 0,13 kg/s bzw. 468,02 l/h. Die durchschnittliche Geschwindigkeit bei einem Rohrradius von 7,75 mm ergibt sich mit: 0,69 m/s. Abbildung 6 visualisiert die zugehörigen Messwerte. Daraus ist ersichtlich, dass der Massenstrom in dem System mit dieser Regelung sehr konstant bleibt, auch wenn sich die Außentemperatur ändert.



Abbildung 7 stellt die Temperaturverläufe während derselben Periode dar. Regelmäßige Temperatureinbrüche der Raumtemperatur (orange) sind auf die Fensterlüftung zurückzuführen.

Abbildung 6: Punktewolke aller Messwerte (Massenstrom) während der Kälteperiode

Ergebnisbericht Salzburger Multifunktionsfassade Hallein

Die Vorlauftemperatur (grün) wurde nach Außentemperatur (gelb) geregelt. Die Raumtemperatur kann durch diese Regelung nahezu konstant zwischen 21 und 22°C gehalten werden. Teilweise erhöht sich die Raumtemperatur mittags, resultierend aus solaren Einträgen durch das Fenster. Dieser Effekt kann am Nachmittag des 28.02.2018 und 03.03.2018 beobachtet werden. Nach der jeweiligen Temperatursenkung durch die Fensterlüftung pendelt sich die Temperatur wieder zwischen 21 und 22°C ein. Das Wiedereinpendeln der Temperatur findet innerhalb von 40-60 Minuten statt.



Raumtemperatur in Abhängigkeit zur Vorlauftemperatur

Abbildung 7: Temperaturverläufe während der Kälteperiode.

Die Temperierung des Messraumes über die Beheizung von außen kann mit diesem simplen Regelalgorithmus gesteuert werden und die Zieltemperatur von 21,5 °C kann wird erreicht.

4.2. Ergebnisse Bauteilmessung



Abbildung 8: Fühlerpositionen im Bauteil

Um Rückschlüsse auf die Temperatur- und Feuchteverteilung im Bauteil schließen zu können wurden Bauteilfühler im Prototypen verbaut. In den weiteren Darstellungen wurden die Bauteilfühler jeweils mit "Messung 4" usw. benannt. Wie in Abbildung 8 ersichtlich handelt es sich beim Wert "Messung 4" um den Messpunkt in der Mitte der aktivierten Betonschicht.

In Abbildung 9 sind alle Temperaturen der Bauteilfühler inklusive Innen- und Außentemperatur ersichtlich.



Temperaturen Raum - Außen - Bauteil

Abbildung 9: Temperaturverläufe Messraum, Außen und Bauteil über den gesamten Messzeitraum

Die rote waagrechte Linie zeigt die gewünschte Zieltemperatur von 21.5 °C an. Gut erkennbar ist, dass die Regelung, wie vorher beschrieben, erst ab dem 16.02.2018 erfolgte und es davor zu einer Übererwärmung des Raumes kam. Dies kann an dem Temperaturverlauf der Messung 4 abgelesen werden. In dieser Schicht sind die Heizungsrohre verlegt und in der ersten Periode liegen die Temperaturen bei bis zu 32,3 °C. Diese Temperaturen werden auch

Ergebnisbericht Salzburger Multifunktionsfassade Hallein

bei - 15 °C Außentemperatur Ende Februar nicht mehr erzielt und sind auch nicht notwendig. Danach läuft das System stabil und konstant zwischen 21,5 °C und 22.5 °C unabhängig von der Außentemperatur. Die Beheizung des Systems von außen weist aufgrund der Materialeigenschaften der bestehenden Ziegelwand inklusive Außenputz eine hohe Trägheit auf, so dass die äußeren Temperaturschwankungen nahezu geglättet werden.

Die Messungen der relativen Feuchtigkeit im Bauteil erlauben eine Beurteilung des Austrocknunspotentials der Konstruktion.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die Ergebnisse der relativen Luftfeuchtigkeit in % nun getrennt für den Messraum und Außen (Abbildung 10) und dem Bauteil (Abbildung 11) abgebildet.

Die relative Luftfeuchtigkeit im Raum liegt im Messzeitraum zwischen minimal 20 % und knapp über 50 %, wobei das Minimum aus einer Stoßlüftung der sehr kalten Periode resultiert. Im Mittel werden auch in der kältesten Periode über 30 % relative Luftfeuchtigkeit erreicht. Während der Messung wurden keine Feuchtequellen zur Regulierung der Feuchte eingesetzt und die Wohnung sowie der Messraum waren für die Zeit der Messung nur von im Forschungsprojekt beteiligten Personen betretbar.

Der Verlauf der relativen Feuchte Außen ist typisch für eine Winterperiode und war relevant für die Validierung der Messung.



Relative Feuchte Messung Innen - Außen



In Abbildung 11 sind die Feuchteverläufe der Bauteilfühler erkennbar. Der Sensor zwischen Bestandswand und neu aufgebrachtem Verfüllmörtel weist bis 21.03.2018 eine Luftfeuchtigkeit von 100 % und nach der Messperiode von 96 % auf. Auch die Messpunkte 4 und 5 fallen über den Zeitraum von 94 % auf 82 % bzw. von 87 % auf 72 %, was einer Trocknung des Bauteils entspricht. Nur der Messpunkt zwischen dem gedübelten Brettsperrholz und der Cellulose nimmt über den Messzeitraum Feuchte auf. Folglich wird die eingebrachte Wassermenge des Verfüllmörtels nach außen abtransportiert und führt zu einer Erhöhung der Feuchte in der vorgefertigten Holzkonstruktion. Der Messfühler 7 wurde zu einem späteren Zeitpunkt eingebaut, daher sind die Messwerte erst ab 09.02.2018 ersichtlich.



Relative Feuchte Bauteilmessung

Abbildung 11: Relative Feuchtigkeit im Bauteil über den gesamten Messzeitraum

Die Messung der relativen Feuchte, sprich des Mikroklimas im Bauteil, erlaubt keine Rückschlüsse auf Massenprozente im Holz. Für die Beurteilung dieser Fragestellungen wird im Kapitel 5 mit der Bauteilsimulation validiert bzw. wird dieses Thema im Teil Untersuchung von Holzfeuchte und pH-Werte, Beschichtungsversuche behandelt.

Die Messperiode war für eine Aussage über die gesamte Trocknung des Bauteils nur über die Messdaten zu kurz. Durch die Validierung dieses Projekts werden Aussagen im Forschungsprojekt "Smart City Hallein - Wohnen findet Stadt!" über die Gebrauchstauglichkeit des Bauteilaufbaus ermöglicht.

4.3. Spezifische Heizleistung des Systems

Über die benannte Kälteperiode hinweg beläuft sich die Leistung der Wandheizung auf durchschnittlich 244 W (Maximale Leistungsabgabe 510 W am 28.02.2018 um 09:00 Uhr). Das Entspricht einer durchschnittlichen Leistungsabgabe von 40,87 W/m² (maximale Leistungsabgabe 85,43 W/m²) über das 5,97 m² große Wandheizungselement. Bezogen auf den gesamten Messraum mit 10,62 m² ergibt sich eine mittlere spezifische Heizlast des Raumes von 22,98 W/m² (maximale spezifische Heizlast: 48,02 W/m²). In diesen Werten sind die Leitungsverluste der ca. 4 m langen Leitungen im konditionierten Bereich und der Temperaturabfall vom Wärmemengenzähler bis zur aktivierten Schicht nicht berücksichtigt.

Das Büro für Bauphysik unter der Leitung von Ao. Univ. Prof. i. R. Dipl.-Ing. Dr. Klaus Kreč errechnete für das Mock-Up eine Leistungsabgabe des Wandelements zur Erreichung der Raumtemperatur von 233 W. Dieser Wert weicht um etwa 4 % von der tatsächlich aufgewandten durchschnittlichen Leistung von 244 W ab.

Durch die außenliegenden Heizungselemente wird ein Anteil der Energie nach Außen verloren, d.h. die Überdämmung der außenliegenden Heizungen ist elementar. (vgl. Schmidt et al, 2017, S. 221)

Laut der Berechnung von Dr. Krec ergeben sich hier bei unterschiedlichen Verhältnissen von Vorlauftemperatur und Raumtemperatur unterschiedliche Verlustanteile, bei einer Vorlauftemperatur von 35°C und einer Raumtemperatur von 20°C macht der Anteil der durch das Fassadenelement als Verlust abgegebenen Energie etwa 35 % aus.

5. Simulation und Validierung des Versuchsaufbaues

Die Validierung des Versuchsaufbaus ist für weitere Projekte mit Bauteilaktivierung von außen in der Sanierung von elementarer Bedeutung. Die gewonnenen Erkenntnisse sowie die validierten Softwarealgorithmen und Parameter können für neue Projekte und neue Forschungsfragen direkt angewandt werden. Die Validierung mittels Gebäudesimulation wird für die weitere Untersuchung von Regelalgorithmen und Energieeffizienz angewandt während die Validierung mittels Bauteilsimulation den Themen Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit nachgehen.

5.1. Validierung mittels Gebäudesimulation

Der gesamte Versuchsaufbau des Mock-Ups wurde in der dynamischen Simulationssoftware IDA – Indoor Climate and Energy (IDA-ICE) abgebildet. Hierbei wurde der Messraum als Untersuchungszone in seinen detaillierten Abmessungen eingegeben. Alle umschließenden Flächen wurden mit den jeweiligen Spezifikationen abgebildet. Hier ist vor allem der Schichtaufbau der Wand mit den bauphysikalisch relevanten Werten wie der Wärmeleitkoeffizient oder die spezifische Dichte relevant.

Die im Testzeitraum gemessenen Parameter, wie

- Außenlufttemperatur und -relative Luftfeuchte,
- Strahlungseinfall auf die Fassadenoberfläche des Mock-Ups
- Innenlufttemperatur und -relative Luftfeuchte in den umliegenden Räumen,
- ein detailliertes Lüftungsprotokoll (siehe Kapitel 3.3),
- die Vorlauf- und Rücklauftemperatur des Fassadenheizelementes
- der Massenstrom im Fassadenheizelement

wurden direkt mit dem Modell verknüpft und der Simulation zugrunde gelegt.

Ziel der Simulation war es, die gemessenen Werte für Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte im Messraum exakt zu reproduzieren.

Ergebnisbericht Salzburger Multifunktionsfassade Hallein



Abbildung 12: Vergleich von gemessener Innenraumtemperatur (blau) zu simulierter Innenraumtemperatur (rot) Wie in Abbildung 12 ersichtlich wurde nach exakter Eingabe aller Parameter ein validiertes Modell gebildet, das den weiteren Simulationen des gesamten Gebäudes zugrunde liegt. Das validierte Modell stellt die Grundlage für weitere Forschungsfragen im Bereich Regelungsalgorithmen und Variierung von Aufbauten dar.

5.2. Validierung mittels Bauteilsimulation

Ein Quadratmeter des Mock-Ups wurde in der Bauteilsimulationssoftware Wufi Pro abgebildet. Hier ist vor allem der Schichtaufbau der Wand mit den bauphysikalisch relevanten Werten wie die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl, die Feuchtespeicherfunktion, der Wärmekoeffizient oder die spezifische Dichte relevant.

Die im Testzeitraum gemessenen Parameter, wie

- Außenlufttemperatur und -relative Luftfeuchte,
- Strahlungseinfall auf die Fassadenoberfläche des Mock-Ups,
- Innenlufttemperatur und -relative Luftfeuchte im Messraum,
- die Vorlauf- und Rücklauftemperatur des Fassadenheizelementes,
- der Massenstrom im Fassadenheizelement,

wurden direkt mit dem Modell verknüpft und der Simulation zugrunde gelegt.

Ziel der Simulation war es, die gemessenen Werte für Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte im Bauteil zu reproduzieren. Beim Vergleich der Bauteiltemperaturen (siehe Abbildung 13) fällt auf, dass die simulierten Temperaturverläufe teils höher sind als die gemessenen, wobei der Verlauf in Messpunkt 3 nahezu ident ist. Obwohl die Wärmeleitfähigkeit in der Holzschicht, aufgrund der Lufteinschlüsse im verdübelten Brettsperrholz, schon stark reduziert wurden (0,10 W/m.K auf 0,04 W/m.K, siehe Kapitel 3) weist der simulierte Messpunkt 6 noch immer eine zu hohe Temperatur gegenüber der Messung auf. Hier bedarf es noch weiteren Untersuchungen um Messungenauigkeiten ausschließen zu können.



Vergleich Temperatur Messung - Simulation

Abbildung 13: Vergleich von gemessenen Bauteiltemperaturen zu simulierten Bauteiltemperaturen

Die Materialkennwerte wurden bei dieser Validierung bereits stark adaptiert und angepasst. Die Genauigkeit der Validierung ist ausreichend für die Beurteilung der Feuchtigkeit.

Ergebnisbericht Salzburger Multifunktionsfassade Hallein

Bei der relativen Feuchtigkeit ergeben sich stärkere Abweichungen zwischen den Messwerten und der Simulation, als bei jenen der Temperatur. Bei den inneren Messpunkten 3 bis 5 stimmen die Tendenz und das Austrocknungspotential im Vergleich zur Messung. Die Simulation des Messpunktes 6 weicht um knapp 30 % von der Realität ab.



Vergleich Relative Feuchte Messung - Simulation

Abbildung 14: Vergleich von gemessenen Bauteilfeuchten zu simulierten Bauteilfeuchten

Da die Austrocknung in der Simulation langsamer erfolgt als bei der Messung, werden bei der Anwendung der Validierung für weitere Untersuchungen risikoarme Ergebnisse hinsichtlich Feuchte erzielt. Sicherheitsbeiwerte sind in der bauphysikalischen Betrachtung nicht vorhanden.

Um beurteilen zu können, ob der validierte Aufbau ausreichend genau ist, werden im nächsten Schritt die Massenprozent des verdübelten Brettsperrholzes untersucht und mit den Messungen in diesem Bericht verglichen. (siehe Abbildung 15). Laut Simulation liegt der Wassergehalt aller Schichten bei 14,5 bis 16 % Massenprozent. Laut den Darrproben (siehe dazu **Untersuchung von Holzfeuchte und pH-Werte, Beschichtungsversuche – FH-Salzburg**, Kapitel 2, S. 66 in diesem Bericht) weisen die innerste Schicht 16,2 %, die zweite Schicht 12,5 %, die dritte Schicht 11,23 % und die vierte und äußerste Schicht 10,9 % auf, d.h. die Simulation erkennt auch kein Problem hinsichtlich Holzfäule, da alle Werte unter 18 % liegen. Die Austrocknung erfolgt langsamer als jene im Prototypen.



Wassergehalt verdübeltes Brettsperrholz

Abbildung 15: Simulationsergebnis für den Wassergehalt in den verschiedenen Schichten des verdübelten Brettsperrholzes

Ergebnisbericht Salzburger Multifunktionsfassade Hallein

Die Validierung kann für weitere Projekte angewendet werden und liefert hinsichtlich Feuchte risikoarme Ergebnisse, da der Prototyp geringere Feuchten nach der Messperiode aufweist als die Simulation. Eine Vermutung ist, dass durch die Lufteinschlüsse im verdübelten Brettsperrholz der konvektive Feuchtetransport sehr rasch erfolgt. Zurzeit werden bei einem anderen Forschungsprojekt vier weitere Messquerschnitte einem Monitoring unterzogen. Hier werden genügend Daten ermittelt um eine genauere Validierung zu erreichen bzw. Messfehler auszuschließen.

6. Conclusio und Ausblick

Das Modell weist eine ausreichende thermische Funktionalität auf. Während der Kälteperiode von 25.02.2018 bis 03.03.2018, in der auch die Norm-Außentemperatur von -13,2 °C (lt. OIB RL 6) unterschritten wurde, konnte das System den Messraum konstant auf einem behaglichen Temperaturniveau halten. Demnach erwies sich die Regelung nach Außentemperatur als funktionstüchtig.

Der Wärmestrom vom Rohr über das Bestandsmauerwerk in den Innenraum funktioniert. Ausschlaggebend dafür ist der Wärmeübergangskoeffizient der Verrohrung, sowie die Herstellung eines gut wärmeleitenden Verbunds zum Bestandsmauerwerk durch den Verfüllmörtel. Es müssen allerdings Verluste nach außen durch das Fassadenelement in Kauf genommen werden, können jedoch durch eine adäquate Wärmedämmung minimiert werden. Aufgrund der niedrigen Vorlauftemperaturen der Bauteilaktivierung eignet sich das Heizsystem auch für Wärmepumpen, welche auf niedrigem Temperaturniveau eine erhöhte Effizienz aufweisen.

Die Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf ist mit 0,45 K im Mittel sehr gering. Die Vorlauftemperatur betrug während der Messdauer im Mittel 31,85 °C. Fußbodenheizungen weisen im Vergleich dazu ein Delta von rund 4 bis 5°C und höher auf. Der Massenstrom ist mit einer Geschwindigkeit von 0,69 m/s zu hoch, dieser sollte 0,50 m/s nicht überschreiten. Ziel für eine weiterentwickelte Regelung sollte es daher sein, die Temperaturspreizung zu erhöhen und den Massenstrom zu mindern. Mögliche Lösungsansätze dafür sind das Vermindern des Verlegeabstandes bzw. das Erhöhen der Vorlauftemperatur.

Durch den Abgleich mit den Messwerten konnte ein validiertes Simulationsmodell geschaffen werden. Hierbei stand die thermische und hygrische Funktionalität im Vordergrund.

Mittels der Software IDA-ICE konnte, basierend auf den Randbedingungen der Messung, ein thermisch validiertes Modell gebildet werden.

Die Simulation mit der Software Wufi Pro ergab einen, gegenüber den tatsächlich gemessenen Werten im Prototypen, langsameren Austrocknungsprozess. Eine mögliche Erklärung dafür sind Lufteinschlüsse im verdübelten Brettsperrholz, die in der Simulation nicht berücksichtigt werden konnten. Bei der Anwendung der Validierung für weitere Untersuchungen werden risikoarme Ergebnisse hinsichtlich Feuchte geliefert.

Mithilfe des Modells werden im Forschungsprojekt "Smart City Hallein - Wohnen findet Stadt!" die Wandheizungselemente und der Bauteilaufbau weiterentwickelt und deren Regelalgorithmen angepasst sowie die Validierungsmodelle verbessert.

7. Literaturhinweis

Karnutsch, M., Leeb, M., Reiter, T. (2016). Wohnen findet Stadt - Integrative Entwicklung von smarten Modernisierungsmaßnahmen am Beispiel der Burgfriedsiedlung Hallein. Blue Globe Report. [Online document]. [Cited 3. May 2018]. Available at: <u>https://www.klimafonds.gv.at/as-sets/Uploads/Blue-Globe-Reports/Smart-Cities/2016-2017/BGR0012017HalleinWohnen-findet-Stadt.pdf</u>

Portugaller, B. (2017). Bauteilaktivierung eines Bestandsmauerwerks im Zuge einer Fassadensanierung – Untersuchung der thermischen Funktionalität. Bachelorarbeit II, FH – Salzburg, Smart Building

Schmidt, C., Altgeld, H., Groß, B., Luther, G., Maas, S.; Scholzen, F. (2017). "Außenliegende Wandtemperierung" – LowEx-Anwendung zur Temperierung von Bestandsgebäuden. in Bauphysik 39, Verlag Ernst & Sohn

ÖNORM EN 13465 (2004) Lüftung von Gebäuden - Berechnungsverfahren zur Bestimmung von Luftvolumenströmen in Wohnungen; Austrian Standards Institute; Wien

OIB Normaußentemperaturen (2015) Österreichisches Institut für Bautechnik. Richtlinie 6 https://www.oib.or.at/sites/default/files/nat 1.pdf



TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN Vienna University of Technology



Fassadensystem – Akustische Optimierung

Endbericht

Simon Hinterseer, BSc

Dipl.-Ing. Dr.techn. Maximilian Neusser

Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bednar

Technische Universität Wien Institut für Hochbau und Technologie Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz

Wien, November 2018

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	29
2.	Grundlagen	29
	2.1. Messmethode	29
	2.2. Modellierung	
	2.3. Einzahlangaben	34
3.	Messungen	35
	3.1. Untersuchte Varianten	35
	3.2. Versuchsaufbau	36
	3.3. Messungen am 24.01.18	
	3.4. Messungen am 25.06.18	40
	3.5. Messungen am 13.09.18	45
4.	Ergebnisse	49
	4.1. Übersicht	49
	4.2. Ergebnisse vom 24.01.2018	50
	4.3. Ergebnisse vom 25.06.2018	51
	4.4. Ergebnisse vom 13.09.2018	54
5.	Schlussfolgerung und Empfehlung	58
6.	Literatur	60
7.	Anhang 1 – Nachhallzeit des leeren Hallraumes	61

1. Einleitung

Im Rahmen eines Forschungsauftrages seitens der FH Salzburg an die TU Wien wurde in Zusammenarbeit ein von der FH Salzburg entwickeltes Fassadensystem hinsichtlich der Absorption von Straßenverkehrslärm optimiert.

Zu diesem Zweck wurden verschiedene Komponenten als äußerste Schicht des Fassadensystems untersucht und der Schichtaufbau des Systems variiert. Die Absorptionseigenschaften der dadurch entstehenden Konstruktionen wurden nach ISO 354 [2] bestimmt.

In diesem Bericht werden die Methodik der Messung und der Modellbildung dargestellt, die Ergebnisse präsentiert und interpretiert und Empfehlungen ausgesprochen.

2. Grundlagen

In diesem Abschnitt werden die Messmethode und Grundlagen zur in diesem Projekt zur Anwendung kommenden Modellbildung dargestellt.

2.1. Messmethode

Die Bestimmung des Absorptionsgrades der Aufbauten wurde nach ISO 354 [2] durchgeführt. Bei dieser Methode wird der zu untersuchende absorbierende Körper in einem Hallraum montiert. Durch die Installation des Prüfkörpers wird die Nachhallzeit des Hallraums reduziert. Durch den Vergleich der Nachhallzeit des leeren Hallraumes mit jener des Hallraumes mit installiertem Prüfkörper kann der Absorptionsgrad des Prüfkörpers ermittelt werden. Die Bestimmung basiert auf der Formel von Sabine. Demnach kann die Absorption eines Rau-

mes so beschrieben werden, dass die gesamte Absorption durch eine fiktive "äquivalente Absorptionsfläche" zustande kommt. Diese wird mit einem Absorptionsgrad von 100 % angenommen und kann aus der gemessenen Nachhallzeit bestimmt werden:

$$A = 55.3 \cdot \frac{V}{c \cdot T} - 4 \cdot m \cdot V \tag{1}$$

Dabei bezeichnen:

Α	Äquivalente Absorptionsfläche in m^2
V	Raumvolumen in m^3
С	Schallgeschwindigkeit in m/s
Т	Nachhallzeit in s
m	Luftabsorptionskoeffizient nach ISO 9613-1 [3]
Aus der Differenz der äquivalenten Absorptionsfläche des leeren Raumes und des Raumes mit eingebautem Prüfkörper ergibt sich die äquivalente Absorptionsfläche des Prüfkörpers. Der Absorptionsgrad des Prüfkörpers α ergibt sich dann aus dem Verhältnis der Prüfkörperfläche *S* und der äquivalenten Absorptionsfläche *A*:

$$\alpha = \frac{A}{S} \tag{2}$$

Die Begriffe äquivalente Absorptionsfläche sowie Nachhallzeit sind hierbei frequenzabhängig zu betrachten. Es hat also jedes Terzband eigene Werte für die äquivalente Absorptionsfläche und die Nachhallzeit.

An den Hallraum werden gewisse Anforderungen betreffend Nachhallzeit, Volumen, Form und das Vorhandensein von Diffusoren gestellt. Dadurch wird gewährleistet, dass einerseits das Schallfeld ausreichend diffus ist, sodass die Ergebnisse nicht zu stark von den Mikrofonpositionen abhängen. Andererseits garantiert die lange Nachhallzeit des leeren Raumes eine hohe Genauigkeit des Verfahrens, da dadurch das Einfügen eines Prüfkörpers eine starke Änderung der Nachhallzeit zur Folge hat.

Der Prüfkörper wird flächig an der Wand oder am Boden des Hallraumes angebracht. Der ermittelte Absorptionsgrad wird auf die auf diese Art überdeckte Fläche bezogen. Daher kann ein Prüfkörper mit strukturierter Oberfläche potentiell viel höhere Absorptionsgrade erzielen als ein flacher Prüfkörper, da er eine größere Oberfläche aufweist. Der Prüfkörper muss eine gewisse Mindestfläche aufweisen, um eine ausreichende Genauigkeit der Messung zu gewährleisten.

Die Bestimmung des Absorptionsgrades nach ISO 354 lässt ein Verfahren mit abgeschaltetem Rauschen und ein Verfahren mit integrierter Impulsantwort zu. In diesem Projekt wurden Messungen mit abgeschaltetem Rauschen durchgeführt. Dabei wird der Raum mit einem unidirektionalen Lautsprecher mit weißem oder rosa Rauschen akustisch angeregt. Nach dem Abschalten wird die Abklingkurve des Rauschens gemessen und daraus die Nachhallzeit bestimmt. Es werden insgesamt mindestens zwölf Abklingkurven gemessen. Dies geschieht indem Quellen und Mikrofonpositionen variiert werden und die Messung wiederholt durchgeführt wird. Das Endergebnis wird durch Mittelung über die Einzelmessungen bestimmt.

2.2. Modellierung

Schallabsorber lassen sich in zwei Kategorien einteilen: poröse Absorber und Resonatoren. Während poröse Absorber in Abhängigkeit der Dicke oberhalb einer gewissen Frequenz einen hohen Absorptionsgrad aufweisen, absorbieren Resonatoren stark in der Nähe ihrer Resonanzfrequenz (siehe Abbildung 16). Ergebnisbericht Salzburger Multifunktionsfassade Hallein



Abbildung 16: Frequenzgang von porösen Absorbern und Resonatoren (Quelle: [1])

Poröse Absorber

Poröse Absorber weisen hohe Absorptionseigenschaften in einem breiten Frequenzbereich auf. Sie werden vor allem aus mineralischen oder organischen Faserstoffen oder geschäumten Kunststoffen hergestellt. Ihre Wirkweise basiert darauf, dass das poröse Material mit seinem Strömungswiderstand die Bewegung der schwingenden Luft bremst und somit dem System Schallenergie entzieht. Ob die Schwingung einer bestimmten Frequenz stark abgedämpft wird, hängt also davon ab, ob diese Schwingungen starke Luftbewegungen im porösen Material verursacht. Eine Schwingung weist in einem Abstand von einer reflektierenden Fläche von $\lambda/4$ ein Maximum der Schallschnelle auf. Befindet sich also in diesem Abstand poröses Material, so werden Schwingungen mit einer Wellenlänge von λ stark abgedämpft. Dieses Phänomen ist in Abbildung 17 dargestellt.



Abbildung 17: Poröser Absorber in ungünstiger Position (links) und in günstiger Position (rechts) (Quelle: [1])

Resonatoren

Verschiedene Resonanz-Effekte können dafür genutzt werden, Schallenergie zu absorbieren. Wie bereits erwähnt, wird dabei vor allem Schall in der Nähe der jeweiligen Resonanzfrequenz absorbiert. Während poröse Absorber (in Abhängigkeit der Dicke, bzw. Abstand zu reflektierenden Flächen) typischerweise im mittleren bis hohen Frequenzbereich am Wirksamsten sind, können Resonatoren auch zur Absorption im niedrigen Frequenzbereich eingesetzt werden. Ein wichtiger Resonanzeffekt, der für akustische Absorber genutzt wird ist der des Helmholtz-Resonators. Dieser besteht aus einem Hohlraum – dem Resonatorvolumen und einer schmalen Verbindung zwischen diesem und der Umgebung – dem Resonatorhals. Es handelt sich hierbei um einen Feder-Masse-Resonator, wobei die Luft im Resonatorvolumen als Feder und die Luft im Resonatorhals als Masse wirken. Der Resonatorhals kann beispielsweise als kreisförmige Öffnung oder als Schlitz in einer Platte realisiert werden. Wesentlich für die Wirkung ist in jedem Fall, dass für einen bestimmten Absorptionsgrad, der Anteil der Öffnungsfläche in der Gesamtfläche der Platte ausreichend groß sein muss. Die Resonanzfrequenz des Systems lässt sich nach Formel (3) näherungsweise bestimmen [1]:

$$f_0 \approx 170 \cdot \sqrt{\frac{S}{V \cdot (t + 2\Delta t)}}$$
(3)

f_0	Resonanzfrequenz in Hz
S	Querschnittsfläche des Resonatorhalses in cm^2
V	Resonatorvolumen in dm^3
$2\Delta t$	Mündungskorrektur in cm ; Diese hängt von der Tiefe des Resonator-
	halses, der Form der Öffnungen und dem Öffnungsanteil im Fall ei-
	nes Lochplattenschwingers ab

Ein weiterer Resonanzeffekt wird mit der Feder-Masse-Resonanz bei Plattenschwingern und Lochplattenschwingern ausgenutzt. Die Platte fungiert dabei als Masse und die dahinter eingeschlossene Luft als Feder. Die Resonanzfrequenz kann näherungsweise angegeben werden als [1]

$$f_0 \approx 510 \cdot \frac{1}{\sqrt{m'd_L}} \tag{4}$$

Dabei bezeichnen:

f_0	Resonanzfrequenz in Hz
m'	Flächenbezogene Masse in kg/m^2
d_L	Dicke des Luftspalts in <i>cm</i>

Ein weiterer Resonanzeffekt, der in manchen Fällen genutzt werden kann ist die Schwingung von Platten im Bereich ihrer Eigenfrequenz. Auch in diesem Bereich weisen Platten einen hohen Absorptionsgrad auf. Jedoch ist dieser typischerweise unbedeutend, da er meist in einem zu niedrigen Frequenzbereich liegt. Die Resonanzfrequenz in Hz kann näherungsweise angegeben werden durch die vierfache Plattendicke in *cm* [1]:

$$f_{Pl} \approx 4 \cdot t$$
 (5)

2.3. Einzahlangaben

Abgesehen von den Angaben des Absorptionsgrades in jedem Terzband werden im vorliegenden Dokument noch Einzahlangaben zu den Konstruktionen gemacht. Beide hier genannten Einzahlwerte sind grundsätzlich geeignet, die Absorptionseigenschaften von Bauprodukten zu beschreiben. Jedoch ist der zweite Wert nach EN 1793-1 [5] besser an die gegebene Situation angepasst.

Bewerteter Schallabsorptionsgrad α_W nach ISO 11654 [4]

Das ist ein dimensionsloser Absorptionsgrad, der durch den Vergleich des gemessenen Absorptionsgrades mit einer Referenzkurve zustande kommt (ähnlich wie die Einzahlangabe zum Schalldämmmaß nach ISO 10140). Diese Angabe ist zwar laut ISO 11654 nicht geeignet zur Beschreibung von "Abschirmwänden an Straßen". Diese Angabe ist jedoch üblich bei Prüfungen nach ISO 354 und wird daher hier angeführt.

Einzahlangabe zur Schallabsorption DL_{α} nach EN 1793-1 [5]

Hierbei handelt es sich um eine Kenngröße zum Vergleich der Absorptionseigenschaften von Lärmschutzwänden und wird in dB angegeben. Grob gesprochen handelt es sich um eine bewertete Abschwächung des Schalls durch Reflexion an der geprüften Fläche. Die Bewertung erfolgt durch das standardisierte Verkehrslärmspektrum nach EN 1793-3 [6]. Dieses A-bewertete Straßenverkehrslärmspektrum ist in Abbildung 18 dargestellt. Bei einer Verkehrslärmseltrum am 08.11.2017 wurde ein Frequenzgang des Verkehrslärms erhoben, der die Bewertungskurve nach EN 1793-3 bestätigt. So konnte beispielsweise gezeigt werden, dass das Maximum des A-bewerteten Verkehrslärms tatsächlich bei 1000 Hz zu erwarten ist.



Abbildung 18: Verkehrslärmspektrum nach EN 1793-3

Ergebnisbericht Salzburger Multifunktionsfassade Hallein

3. Messungen

In diesem Abschnitt werden die Varianten der untersuchten Konstruktionen präsentiert. Die Ergebnisse der Messungen sind im Abschnitt 4 zu finden.

3.1. Untersuchte Varianten

Es wurden insgesamt 17 Varianten des Fassadensystems untersucht. Diese basieren auf einem weitgehend gleichbleibenden Grundkörper und unterscheiden sich vor allem durch die äußerste Schicht und die Hinterlüftungstiefe.

Grundkörper

Der Grundkörper ist in Abbildung 19 dargestellt.



Schnitt M-02 M1:20

Abbildung 19: Beispiel eines Grundkörpers (Quelle: FH Salzburg)

Er besteht aus einem Holzrahmen mit Dämmstoffeinlage. Beim ersten Messtermin (Messung 1-5) wurde noch ein unverleimter Holzrahmen mit größerer Holzdicke eingesetzt. Als Dämmstoff wurden Zellulose und Holzfaserplatten verwendet. In allen anderen Varianten wurde stets der in Abbildung 19 dargestellte Grundkörper verwendet.

Übersicht über die Messungen

In Tabelle 3 sind die 20 Messungen aufgelistet, die durchgeführt wurden.

018	Messung 1	Grundkörper mit Holzfaserdämmung, Fassadenplatte Velox Baumrinde
	Messung 2	Grundkörper mit Holzfaserdämmung, Holzplattenfassade
1.2	Messung 3	Grundkörper mit Zellulosedämmung, Holzplattenfassade
24.0	Messung 4	Grundkörper mit Zellulosedämmung, Fassadenplatte Velox Baumrinde
	Messung 5	wie Messung 4 jedoch ohne Schalungsbretter über der Dämmschicht
	ab hi	er wird ein neuer Grundkörper mit Zellulosedämmung verwendet
	Messung 6	Grundkörper ohne abschließende Schicht
		Grundkörper, Oberfläche aus 5 cm breiten Holzelementen mit 8 mm Spalt
	Messung 7	dazwischen
18		Grundkörper, Oberfläche aus 5 cm breiten Holzelementen mit 16 mm Spalt
.20	Messung 8	dazwischen
90.0	Messung 9	Grundkörper, Oberfläche aus gelochter Holzplatte (Lochanteil ca 1%)
5	Messung 10	Grundkörper, Fassadenplatte Velox Baumrinde gelocht (Lochanteil ca 1%)
	Messung 11	Grundkörper mit Fassadenplatte Velox Rille
	Messung 12	Grundkörper mit Fassadenplatte Velox Baumrinde
	Messung 13	Fassadenplatte Velox Baumrinde ohne Grundkörper
		bis hier ist die Tiefe der Hinterlüftungsebene stets 5 cm
	Messung 14	Grundkörper mit Fassadenplatte Velox Baumrinde, Hinterlüftungstiefe 8 cm
	Messung 15	Grundkörper mit Fassadenplatte Velox Rille, Hinterlüftungstiefe 8 cm
18	Messung 16	Grundkörper mit Fassadenplatte Velox Baumrinde, Hinterlüftungstiefe 12 cm
.20	Messung 17	Grundkörper mit Fassadenplatte Velox Rille, Hinterlüftungstiefe 12 cm
60.	Messung 18	Grundkörper mit aufgestellten Holzelementen
13		Grundkörper mit Fassadenplatte Velox Baumrinde, 1 cm Spalt zwischen den
	Messung 19	Platten (Spaltanteil ca 2%)
	Messung 20	Grundkörper ohne abschließende Schicht

Tabelle 3: durchgeführte Messungen

3.2. Versuchsaufbau

Es werden jeweils 9 m² der betreffenden Variante im Hallraum des TGM (Technologisches Gewerbemuseum, Wexstraße 19-23, 1200 Wien) montiert. In ISO 354 ist ein Probekörper von 10-12 m² vorgesehen. Es sind jedoch durch die reduzierte Fläche nur geringe Ungenauigkeiten zu erwarten. Durch die große Masse der Systeme ist es erforderlich die Elemente aufzuteilen, sodass 6 m² an der Wand und 3 m² auf dem Boden montiert werden. Erhöhte Unge-

nauigkeiten der Messungen aufgrund erhöhter Randfläche müssen in Kauf genommen werden. Die Randflächen lassen aufgrund der Konstruktion jedoch einen hohen Reflexionsgrad vermuten, weshalb nur geringe Ungenauigkeiten dadurch zu erwarten sind.

3.3. Messungen am 24.01.18

Bei den Messungen am 24.01.2018 ist erwähnenswert, dass zwei Grundkörper zur Anwendung kamen: Einer mit Holzfaserdämmung und einer mit Zellulosedämmung. Auf diesen Grundkörpern wurden eine Holzdeckelfassade sowie Fassadenplatten vom Typ Velox Baumrinde getestet.

Messung 1

Diese Variante ist durch den Einsatz von Holzfaserdämmung und Velox Elementen gekennzeichnet.



Abbildung 20: Messung 1 – Grundkörper mit Holzfaserdämmung, Fassadenplatte Velox Baumrinde

Messung 2

Diese Variante ist durch Holzfaserdämmung und Holzfassadenplatten gekennzeichnet.



Abbildung 21: Messung 2 - Grundkörper mit Holzfaserdämmung, Holzplattenfassade (Quelle: FH Salzburg)

Diese Variante ist durch Zellulosedämmung und Holzfassadenplatten gekennzeichnet.



Abbildung 22: Messung 3 – Grundkörper mit Zellulosedämmung, Holzplattenfassade, (Quelle: FH Salzburg)

Messung 4

Diese Variante kombiniert Velox Elemente mit Zellulosedämmung.



Abbildung 23: Messung 4 – Grundkörper mit Zellulosedämmung, Fassadenplatte Velox Baumrinde, (Quelle: FH Salzburg)

Messung 5 weist Velox Elemente und Zellulosedämmung auf und stimmt diesbezüglich weitgehend mit Messung 4 überein. Der einzige Unterschied besteht darin, dass hier die Rauschalung (1,5 cm Holzplatte) weggelassen wurde.



Abbildung 24: Messung 5 – Grundkörper mit Zellulosedämmung, Fassadenplatte Velox Baumrinde, keine Schalung, (Quelle: FH Salzburg)

3.4. Messungen am 25.06.18

Im Gegensatz zu den Messungen am 24.01.2018 wurde nur ein Grundkörper mit Zellulosedämmung untersucht. Es wurde jedoch nicht der Grundkörper von den Messungen am 24.01.2018 verwendet, da dieser durch den Wegfall eines Projektpartners nicht mehr verfügbar war. Stattdessen wurde ein neuer Grundkörper gefertigt.

Die Messungen am 25.06.2018 untersuchen einerseits verschiedene Möglichkeiten Helmholtzabsorber im Fassadensystem einzusetzen. Außerdem wird die Fassadenplatte "Rille" untersucht.

Bei Messung 6 wurde der neue Grundkörper isoliert untersucht.



Abbildung 25: Messung 6 - Grundkörper ohne abschließende Schicht, (Quelle: FH Salzburg)

Messung 7

Bei Messung 7 wird ein Helmholtzabsorber in der Form eines Schlitzabsorbers untersucht.



Abbildung 26: Messung 7 – Grundkörper, Oberfläche aus 5 cm breiten Holzelementen mit 8 mm Spalt dazwischen, (Quelle: FH Salzburg)

Bei Messung 8 wird ein weiterer Schlitzabsorber mit vergrößerter Schlitzbreite untersucht.



Abbildung 27: Messung 8 – Grundkörper, Oberfläche aus 5 cm breiten Holzelementen mit 16 mm Spalt dazwischen, (Quelle: FH Salzburg)

Messung 9

Bei Messung 9 wird ein Helmholtzabsorber untersucht bei dem eine gelochten Platte eingesetzt wird.



Abbildung 28: Messung 9 – Grundkörper, Oberfläche aus gelochter Holzplatte (Lochanteil ca. 1%), (Quelle: FH Salzburg)

Bei Messung 10 wird ein Helmholtzabsorber untersucht bei dem eine gelochte Fassadenplatte vom Typ Velox Baumrinde eigesetzt wird.



Abbildung 29: Messung 11 – Grundkörper, Fassadenplatte Velox Baumrinde gelocht (Lochanteil ca. 1%), (Quelle: FH Salzburg)

Messung 11

Bei Messung 11 wird die Fassadenplatte "Rille" untersucht.



Abbildung 30: Messung 11 – Grundkörper, Fassadenplatte Velox Rille (Quelle: FH Salzburg)

Bei Messung 12 wird die Fassadenplatte Baumrinde untersucht, um eine Vergleichsgrundlage mit Messungen vom 24.01.2018 zu erhalten, an dem das Produkt Baumrinde am anderen Grundkörper untersucht wurde. So können etwaige Unterschiede zwischen den akustischen Eigenschaften der Grundkörper untersucht werden.



Abbildung 31: Messung 12 - Grundkörper, Fassadenplatte Velox Baumrinde, (Quelle: FH Salzburg)

Messung 13

Bei Messung 13 wurde das Produkt Baumrinde ohne Grundkörper untersucht.



Abbildung 32: Messung 13 – Fassadenplatte Velox Baumrinde ohne Grundkörper

3.5. Messungen am 13.09.18

Nachdem am 25.06.2018 die Möglichkeiten Helmholtzabsorber einzusetzen untersucht wurden, wurde am dritten und letzten Termin einerseits die Möglichkeit der Variation der Hinterlüftungstiefe und andererseits eine weitere Variante des Helmholtzabsorbers untersucht.

Messung 14

Bei Messung 14 wird die Fassadenplatte Baumrinde mit vergrößerter Hinterlüftungstiefe von 8 cm untersucht.



Abbildung 33: Messung 14 – Grundkörper mit Fassadenplatte Velox Baumrinde, Hinterlüftungstiefe 8 cm (Quelle: FH Salzburg)

Messung 15

Bei Messung 15 wird die Fassadenplatte Rille mit vergrößerter Hinterlüftungstiefe von 8 cm untersucht.



Abbildung 34: Messung 15 – Grundkörper mit Fassadenplatte Velox Rille, Hinterlüftungstiefe 8 cm (Quelle: FH Salzburg)

Bei Messung 16 wird die Fassadenplatte Baumrinde mit vergrößerter Hinterlüftungstiefe von 12 cm untersucht.



Abbildung 35: Messung 16 – Grundkörper mit Fassadenplatte Velox Baumrinde, Hinterlüftungstiefe 12 cm, (Quelle: FH Salzburg)

Messung 17

Bei Messung 17 wird die Fassadenplatte Rille mit vergrößerter Hinterlüftungstiefe von 12 cm untersucht.



Abbildung 36: Messung 17 – Grundkörper mit Fassadenplatte Velox Rille, Hinterlüftungstiefe 12 cm (Quelle: FH Salzburg)

Bei Messung 18 wird ein neuer Helmholtzabsorber mit aufgestellten Holzelementen untersucht.



Abbildung 37: Messung 18 - Grundkörper mit aufgestellten Holzelementen (Quelle: FH Salzburg)



Abbildung 38: Messung 18 - Detaildarstellung: aufgestellte Holzelemente (Quelle: FH Salzburg)

Bei Messung 19 wird die Fassadenplatte Baumrinde so montiert, dass sich 1 cm breite Lücken zwischen den Platten ergeben. Auf diese Art und Weise wird ein Schlitzabsorber realisiert.



Abbildung 39: Messung 19 Grundkörper mit Fassadenplatte Velox Baumrinde, 1 cm Spalt zwischen den Platten (Spaltanteil ca. 2%), (Quelle: FH Salzburg)

Messung 20

Bei Messung 20 wird wie schon beim Messtermin am 25.06.2018 der Grundkörper für sich untersucht.



Abbildung 40: Messung 20 - Grundkörper ohne abschließende Schicht

Ergebnisbericht Salzburger Multifunktionsfassade Hallein

4. Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Messergebnisse dargestellt.

4.1. Übersicht

Eine Übersicht über alle Messergebnisse wird in Tabelle 4 gegeben. Zu den hier angeführten Einzahlangaben siehe auch Abschnitt 0)

Tabelle 4: Übersicht über alle Messungen

	α_W	DL_{α} in dB
Grundkörper mit Holzfaserdämmung, Fassadenplatte Velox Baumrinde	0,55	4,0
Grundkörper mit Holzfaserdämmung, Holzplattenfassade	0,15	0,7
Grundkörper mit Zellulosedämmung, Holzplattenfassade	0,15	0,8
Grundkörper mit Zellulosedämmung, Fassadenplatte Velox Baumrinde	0,6	4,0
Grundkörper mit Zellulosedämmung, Fassadenplatte Velox Baumrinde, keine Schalung	0,55	4,1
Grundkörper	0,55	3,3
Grundkörper, Oberfläche aus 5 cm breiten Holzelementen mit 8	0,3	2,1
mm Spalt dazwischen		
Grundkörper, Oberfläche aus 5 cm breiten Holzelementen mit 16 mm Spalt dazwischen	0,4	2,8
Grundkörper, Oberfläche aus gelochter Holzplatte (Lochanteil ca. 1%)	0,2	0,9
Grundkörper, Fassadenplatte Velox Baumrinde gelocht (Lochan- teil ca. 1%)	0,6	4,7
Grundkörper mit Fassadenplatte Velox Rille	0,75	7,5
Grundkörper mit Fassadenplatte Velox Baumrinde	0,5	3,4
Fassadenplatte Velox Baumrinde ohne Grundkörper	0,5	2,9
Grundkörper	0,55	3,6
Grundkörper mit Fassadenplatte Velox Baumrinde, 1 cm Spalt zwischen den Platten (Spaltanteil ca. 2%), Hinterlüftungstiefe 6 cm	0,5	3,4
Grundkörper mit Fassadenplatte Velox Baumrinde, Hinterlüf- tungstiefe 8 cm	0,4	2,9
Grundkörper mit Fassadenplatte Velox Baumrinde, Hinterlüf- tungstiefe 12 cm	0,45	3,0
Grundkörper mit Fassadenplatte Velox Rille, Hinterlüftungstiefe 8 cm	0,75	7,5
Grundkörper mit Fassadenplatte Velox Rille, Hinterlüftungstiefe 12 cm	0,7	7,2
Grundkörper mit aufgestellten Holzelementen	0,7	5,2

4.2. Ergebnisse vom 24.01.2018

Bei den Messungen am 24.01.2018 ist vor allem zu erkennen, dass die Systeme mit den Fassadenplatten aus Holzspanbeton einen weit höheren Absorptionsgrad aufweisen als Systeme mit Holzdeckelfassade. Die geringen Absorptionsgrade der Konstruktionen mit Holzfassade sind wenig überraschend, da hier eine starke reflektierende Wirkung der Holzfassade zu erwarten ist. Die verschiedenen Peaks bei Systemen mit Fassadenplatte Baumrinde wurden hinsichtlich der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Methoden der Modellbildung analysiert. Es konnte jedoch keine zufriedenstellende Erklärung gefunden werden. Es bleibt daher nur die Beobachtung, dass es bei diesen Platten zu einem hohen Grad an Schallabsorption kommt. Die Messergebnisse sind in Abbildung 41 als Absorptionsgrad im Frequenzverlauf und in Tabelle 5 als Einzahlwerte dargestellt.



Abbildung 41: Messergebnisse vom 24.01.2018; G1 bezieht sich auf den Grundkörper mit Holzfaserdämmung, G2 bezieht sich auf den Grundkörper mit Zellulosedämmung

Tabelle 5: Messergebnisse vom 24.01.2018

	α_W	DL_{α} in dB
Grundkörper mit Holzfaserdämmung, Fassadenplatte Velox Baumrinde	0,55	4,0
Grundkörper mit Holzfaserdämmung, Holzplattenfassade	0,15	0,7
Grundkörper mit Zellulosedämmung, Holzplattenfassade	0,15	0,8
Grundkörper mit Zellulosedämmung, Fassadenplatte Velox Baumrinde	0,6	4,0
Grundkörper mit Zellulosedämmung, Fassadenplatte Velox Baumrinde, keine Schalung	0,55	4,1

4.3. Ergebnisse vom 25.06.2018

Ergebnisse der Helmholtzabsorber

Bei den Helmholtzabsorbern zeigt sich, dass sie im Bereich ihrer Resonanzfrequenz stark absorbieren, jedoch abseits dieser Frequenz nur einen geringen Absorptionsgrad aufweisen. Das untersuchte System mit der Lochplatte weist überdies sogar im Bereich der Resonanzfrequenz einen Absorptionsgrad von nur 0,5 auf, was auf den geringen Lochanteil von ca. 1 % zurückzuführen ist.

Für das System mit hinterschnittener Holzfassade mit 8 mm Spalt wurde rechnerisch eine Resonanzfrequenz von 330 Hz bestimmt. In der Messung konnte ein Peak mit Mittenfrequenz von 350 Hz beobachtet werden. Für das System mit 16 mm Spalt wurde eine Resonanzfrequenz von 425 Hz berechnet und ein Peak mit Mittenfrequenz von 500 Hz beobachtet. Diese Abweichungen können durch Ungenauigkeit in der Modellbildung oder ungenaue Kenntnis der tatsächlich ausgeführten Geometrie des Probekörpers zustande kommen. Die Messergebnisse sind in Abbildung 42 als Absorptionsgrad im Frequenzverlauf und in Tabelle 6 als Einzahlwerte dargestellt.



Abbildung 42: Messergebnisse der Helmholtzabsorber vom 25.06.2018;

Tabelle 6: Messergebnisse der Helmholtzabsorber vom 25.06.2018

	α_W	DL_{α} in dB
Grundkörper	0,55	3,3
Grundkörper, Oberfläche aus 5 cm breiten Holzelementen mit 8	0,3	2,1
mm Spalt dazwischen		
Grundkörper, Oberfläche aus 5 cm breiten Holzelementen mit 16 mm Spalt dazwischen	0,4	2,8
Grundkörper, Oberfläche aus gelochter Holzplatte (Lochanteil ca. 1 %)	0,2	0,9

Ergebnisse der Systeme mit Velox Fassadenplatten

Bei diesen Systemen zeigen sich die bereits vom Messtermin am 24.01.2018 gewohnt hohen Absorptionsgrade. Bemerkenswert sind bei diesen Messungen vor allem, dass das System mit der Fassadenplatte "Rille" weit höhere Absorptionswerte aufweist als jenes mit der Fassadenplatte "Baumrinde". Dies kann durch die größere Oberfläche erklärt werden, die durch die Oberflächenstruktur dieser Platte entsteht. Außerdem kann beobachtet werden, dass das System mit der gelochten Variante der Fassadenplatte "Baumrinde" deutlich höhere Absorptionsgrade aufweist, als jenes mit der ungelochten. Das kann daran liegen, dass mehr Schallenergie in die Konstruktion eindringen und in dieser abgebaut werden kann. Absorption aufgrund der Helmholtzresonanz kann bei dem System mit der gelochten Fassadenplatte "Baumrinde" nicht beobachtet werden.

Die Messergebnisse sind in Abbildung 43 als Absorptionsgrad im Frequenzverlauf und in Tabelle 7 als Einzahlwerte dargestellt.



Abbildung 43: Messergebnisse der Systeme mit Velox Fassadenplatten vom 25.06.2018;

Tabelle 7: Messergebnisse	der Systeme mit Velox Fas	sadenplatten vom 25.06.2018

	α_W	DL_{α} in dB
Grundkörper	0,55	3,3
Grundkörper, Fassadenplatte Velox Baumrinde ge- locht (Lochanteil ca. 1 %)	0,6	4,7
Grundkörper mit Fassadenplatte Velox Rille	0,75	7,5
Grundkörper mit Fassadenplatte Velox Baumrinde	0,5	3,4
Fassadenplatte Velox Baumrinde ohne Grundkörper	0,5	2,9

Bemerkenswert ist außerdem das Ergebnis der Fassadenplatte Baumrinde ohne Grundkörper. Diese Variante weist einen markanten Peak um 500 Hz auf. Dies ist mit der Modellbildung nach Abschnitt 2.2 nicht nachvollziehbar. Zu modellieren wäre diese Konstruktion als poröser Absorber mit variabler Dicke (2-8 cm). Hier würde das Lambda-Viertel-Gesetz starke Absorption oberhalb von 1000 Hz (8 cm) und ein abflachen des Anstieges ab ca. 4000 Hz vorhersagen. Die Messergebnisse für diesen Körper spiegeln das nicht wieder.

4.4. Ergebnisse vom 13.09.2018

Bei diesem Messtermin wurden die Hinterlüftungstiefen von Systemen mit Holzspanbeton Fassadenplatten variiert, um deren Absorptionseigenschaften zu verbessern. Das basierte auf der Annahme, dass diese Platten sich wie poröse Absorber verhalten. Eine Vergrößerung der Hinterlüftungstiefe würde dann zu einer Verbesserung der Absorptionseigenschaften im tiefen Frequenzbereich führen. Diese Verbesserung konnte jedoch nicht beobachtet werden. Außerdem wurden bei einer der Varianten die Platten zerteilt, sodass eine schlitzförmige Öffnung entsteht. Bei dieser ist ein Helmholtz-Resonanz-Effekt in Form eines Absorptionspeaks bei 100 Hz zu erwarten. Dieser lässt sich allerdings nicht beobachten.

Systeme mit Fassadenplatte Baumrinde

Die Messergebnisse sind in Abbildung 44 als Absorptionsgrad im Frequenzverlauf und in Tabelle 8 als Einzahlwerte dargestellt.



Abbildung 44: Messergebnisse der Systeme mit Fassadenplatte Baumrinde vom 13.09.2018;

Tabelle 8: Messergebnisse der Systeme mit Fassadenplatte Baumrinde vom 13.09.2018

	α_W	DL_{α} in dB
Grundkörper	0,55	3,6
Grundkörper mit Fassadenplatte Velox Baumrinde, 1 cm Spalt zwischen den Platten (Spaltanteil ca. 2%), Hinterlüftungstiefe 6 cm	0,5	3,4
Grundkörper mit Fassadenplatte Velox Baumrinde, Hinterlüftungs- tiefe 8 cm	0,4	2,9
Grundkörper mit Fassadenplatte Velox Baumrinde, Hinterlüftungs- tiefe 12 cm	0,45	3,0

Systeme mit Fassadenplatte Rille

Die Messergebnisse sind in Abbildung 45 als Absorptionsgrad im Frequenzverlauf und in Tabelle 8 als Einzahlwerte dargestellt. Zum Vergleich ist hier auch das Ergebnis dieser Fassadenplatte vom 25.06.2018 dargestellt.

Auch hier zeigen sich nicht die erhofften Verbesserungen im niedrigen Frequenzbereich infolge der Vergrößerten Hinterlüftungstiefe.



Abbildung 45: Messergebnisse der Systeme mit Fassadenplatte Rille vom 13.09.2018 und vom 25.6.2018

Tabelle 9: Messergebnisse der Systeme mit Fassadenplatte Rille vom 13.09.2018 und vom 25.06.2018

	α_W	DL_{α} in dB
Grundkörper	0,55	3,6
Grundkörper mit Fassadenplatte Velox Rille, Hinterlüftungstiefe 8 cm (Messung vom 25.6.2018)	0,75	7,5
Grundkörper mit Fassadenplatte Velox Rille, Hinterlüftungstiefe 8 cm	0,75	7,5
Grundkörper mit Fassadenplatte Velox Rille, Hinterlüftungstiefe 12 cm	0,7	7,2

Holzschalung vertikal und Vergleich der Systeme

Das Absorptionsverhalten des Systems mit aufgestellten Holzelementen ist vor allem vom Helmholtz-Resonanz-Effekt geprägt. Der Schlitzabsorber sollte laut Berechnung einen Absorptionspeak um 540 Hz aufweisen, was auch in den Messergebnissen beobachtet werden kann.

Vergleicht man die Systeme, so lässt sich erkennen, dass Systeme mit der Fassadenplatte Rille den höchsten Absorptionsgrad aufweisen, was bereits bei den vorangegangenen Messterminen sichtbar wurde.

Ein Vergleich der Systeme ist in Abbildung 46 als Absorptionsgrad im Frequenzverlauf und in Tabelle 10 als Einzahlwerte dargestellt.



Abbildung 46: Vergleich der Systeme vom 13.09.2018;

Tabelle 10: Vergleich der Systeme vom 13.09.2018

	α_W	DL_{α} in dB
Grundkörper	0,55	3,6
Grundkörper mit Fassadenplatte Velox Rille, Hinterlüftungstiefe 8 cm	0,75	7,5
Grundkörper mit Fassadenplatte Velox Baumrinde, Hinterlüftungs- tiefe 8 cm	0,4	2,9
Grundkörper mit aufgestellten Holzelementen	0,7	5,2

5. Schlussfolgerung und Empfehlung

Die Messungen spiegeln sehr stark wieder, dass Fassadensysteme, die aufgrund ihrer Oberflächenstruktur eine große Oberfläche haben, hohe Absorptionsgrade aufweisen.

Die am stärksten absorbierenden Varianten waren die Konstruktionen mit der Fassadenplatte Velox "Rille". Diese Varianten unterscheiden sich noch durch die Tiefe des Hohlraumes hinter der Platte. Dieser beeinflusst die Position eines Peaks im niedrigen Frequenzbereich. Dadurch haben Konstruktionen mit geringerer Hohlraumtiefe bessere Werte erzielt, da der Peak dadurch in höhere Frequenzbereiche gefallen ist, die in den Einzahlwerten stärker gewichtet werden.

Die zweitbesten Ergebnisse hat die Konstruktion mit aufgestellten Holzelementen erzielt. Deren Verhalten ist stark geprägt von einem Helmholtz-Resonanz-Effekt um 600 Hz. Jedoch auch abseits der Helmholzresonanzfrequenz zeigt diese Konstruktion einen hohen Absorptionsgrad. Dieser ist vermutlich auf die große Oberfläche zurückzuführen, die durch die aufgestellten Holzelemente zustande kommt.

Die Varianten des Produktes "Baumrinde" weisen zwar einen hohen Absorptionsgrad auf. Dieser ist jedoch deutlich niedriger als jener des Produktes "Rille". Dies liegt vermutlich an der geringeren Oberfläche, dieses Produktes.

Die anfängliche Vermutung, dass sich die Velox Produkte wie poröse Absorber verhalten würden hat sich nicht bestätigt. Es legt jedoch das Auftreten der Peaks im niedrigen Frequenzbereich, deren Lage von der Tiefe des Hohlraums abhängig ist, nahe, dass diese Fassadenplatten als Lochplatten (mit Löchern und Schlitzen von wenigen Millimetern Durchmesser) modelliert werden können, und die Peaks aufgrund von Helmholtz-Resonanz-Effekten auftreten. Sollte sich diese Vermutung bestätigen, so könnte dieser Effekt insbesondere beim Produkt "Rille" dazu genutzt werden, durch Variation der Tiefe des Hohlraumes im Bereich zwischen 100 Hz und 700 Hz einen maßgeschneiderten Peak zu erzeugen. Um dies zu bestätigen oder zu widerlegen wären jedoch weitere Messungen erforderlich.

Die Helmholtzabsorber haben nur dann eine starke Absorption bei der Resonanzfrequenz gezeigt, wenn sie einen hohen Loch-/bzw. Schlitzanteil von über 10 % aufwiesen. Bei Absorbern mit Loch-/Schlitzanteil von 1-2% konnten keine hohen Absorptionswerte bei der Resonanzfrequenz erzielt werden.

Aufgrund des hohen Absorptionsgrades ist das Produkt "Rille" mit möglichst geringer Hohlraumtiefe (Messung 11) am besten geeignet, um den gesamt-Schallpegel im Außenraum neben einer befahrenen Straße zu reduzieren. Dies lässt sich am besten am Kennwert DL_{α} ablesen, der mit einer Gewichtung eines A-bewerteten Verkehrslärmspektrums versehen ist.

Ergebnisbericht Salzburger Multifunktionsfassade Hallein

Soll ein System gewählt werden, das keine Holzspanbetonoberfläche aufweist, so ist die Konstruktion mit aufgestellten Holzelementen (Messung 18) jene, die die besten Absorptionseigenschaften aufweist. 6. Literatur

[1] Fasold, W., Veres, E., *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, ISBN 3-345-00549-2, Verlag für Bauwesen, Berlin 1998

[2] ÖNORM EN ISO 354:2003, Akustik - Messung der Schallabsorption in Hallräumen

[3] ISO 9613-1:1993, Acoustics -- Attenuation of sound during propagation outdoors Calculation of the absorption of sound by the atmosphere

[4] ÖNORM EN ISO 11654:2017, Akustik - Schallabsorber - Bewertung von Schallabsorptionsgraden

[5] ÖNORM EN 1793-1:2017, Lärmschutzvorrichtungen an Straßen - Prüfverfahren zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften - Teil 1: Produktspezifische Merkmale der Schallabsorption in diffusen Schallfeldern

[6] ÖNORM EN 1793-3:1998, Lärmschutzeinrichtungen an Straßen - Prüfeigenschaften zur Bestimmung der akustischen Eigenschaften - Teil 3: Standardisiertes Verkehrslärmspektrum

Ergebnisbericht Salzburger Multifunktionsfassade Hallein

7. Anhang 1 – Nachhallzeit des leeren Hallraumes

An allen drei Messterminen wurde die Nachhallzeit des leeren Hallraumes gemessen. Es wurden dabei weitgehend übereinstimmende Ergebnisse erzielt (siehe Abbildung 47).



Abbildung 47 – Nachhallzeit leerer Raum



FH Salzburg Holztechnologie & Holzbau

Holzfeuchte, pH-Wert und Beschich-

tungsversuche

Gravimetrische Holzfeuchtebestimmung und pH-Wert Messung, sowie Beschichtungsversuche für das Projekt SMF, Baustelle Hallein, Salzachtalstraße 32/34, Probennahme aus Mockup am 24.05.2018 und am 04.06.2018



Holzfeuchtemessung vor Probennahme DI(FH) DI Hermann Huber FH-Prof. DI (FH) Dr. Thomas Schnabel Benjamin Portugaller, BSc Fachhochschule Salzburg Holz und Biogene Technologien Kuchl, Dezember.2018

Technik Gesundheit Medien

Inhaltsverzeichnis

1.	Probennahme	65
2.	Holzfeuchtebestimmung	69
3.	pH-Wert Messung	75
4.	Beschichtungsversuche	75
5.	Quellen	77

Ergebnisbericht Salzburger Multifunktionsfassade Hallein

1. Probennahme

Die Probennahme erfolgte an zwei Terminen, da bei der ersten Entnahme die Heizleitung, welche ungeplant nah an der inneren Holzoberfläche lag, beschädigt wurde und das auslaufende Heizwasser zu einer Befeuchtung der inneren Oberfläche des Probenkörpers führte.

• Probennahme am 24.05.2018:

Die Durchführung der Probennahme am 24.05.2018 erfolgte gemeinsam mit dem Ingenieurbüro Zauner (Julian Trampitsch). Die Entnahme der Probekörper erfolgte durch die FH Salzburg (Dr. Thomas Schnabel, DI Hermann Huber, Benjamin Portugaller). Die Entnahmestelle der Probenkörper lag zwischen den beiden Fenstern im unteren Bereich (Sockel) der Musterfassade (Abb. 1 und 2).



Abb 1: Vorbereitung Probenentnahme 24.05.2018



Abb 2: Position der ersten Probenentnahme

Nach dem Öffnen der Fassadenbekleidung und dem Entfernen der Wärmedämmung (Zellulose, hohlraumfrei und fest im Gefach sitzend) erfolgte eine Bestimmung der Holzfeuchte an der Oberfläche des Holz 100 Elements (erste Lamellenlage) mittels elektrischer Widerstandsmessung (GANN Hydromette BL E mit Einschlagelektroden, Abb. 3). Die elektrische Messung ergab eine Holzfeuchte von 11,0 %. Im Anschluss an die Feuchtebestimmung wurde ein Probenkörper mit den Abmessungen von ca. 15x15cm aus dem Holz 100 Element entnommen.


Abb 3: Holzfeuchtebestimmung vor Probennahme körpers



Abb 4: Befeuchtete Lamellen des ersten Proben-

Auf Grund der starken Befeuchtung des Probekörpers (Abb. 4) durch die Beschädigung der Heizleitung wurde direkt angrenzend ein zweiter Probenkörper mit geringerer Feuchtebelastung entnommen. Der zweite Probenkörper wies eine Holzfeuchte an der äußeren Oberfläche (erste Lamellenlage) von 12,9 % auf (Abb. 5), an der inneren Oberfläche (innere Lamellenlage, direkt dem Verfüllmörtel angeschlossen) von 24,3 % auf (Abb. 6). Die Messung erfolgte mittels GANN Hydromette BL E mit Einschlagelektroden.



Abb 5: Holzfeuchte 2. Probe äußere Lamelle



Abb 6: Holzfeuchte 2. Probe innere Lamelle

Die exakte Holzfeuchtebestimmung mittels gravimetrischer Methode erfolgte anschließend in den Labors am Campus Kuchl der FH Salzburg.

• Probennahme am 04.06.2018:

Um einen Einfluss der unplanmäßigen Befeuchtung des Holzes bei der ersten Probeentnahme auszuschließen, wurde an einer, oberhalb der beschädigten Heizleitung liegenden Stelle ein weiterer Probenkörper entnommen (Abb. 7). Die Durchführung der zweiten Probennahme erfolgte gemeinsam mit dem Architekturbüro Schweizer (Martin Embacher), dem Ingenieurbüro Zauner (Benjamin Zauner, Julian Trampitsch) und der Fa. Innovaholz GmbH (Thomas Hartl, Hannes Lanner). Die Entnahme der Probekörper erfolgte durch die Fa. Innovaholz GmbH (Hannes Lanner).

Im Bereich der Bauteilöffnung wurden, wie bereits bei der ersten Entnahme festgestellt, keine Hohlräume der Zellulosedämmung festgestellt, die Dämmung saß fest im Gefach (Abb 8).





Abb 7: Vorbereitung der Probenentnahme Abb 8: Bereich der Bauteilöffnung mit sichtbarer Zellulosedämmung

Nach der Entnahme der Dämmung wurde ein Probenkörper von ca. 40x70 cm schichtweise entnommen (Abb. 9). Ein Teil der Lamellen wurde vom IB Zauner mitgenommen und auf Schimmelbefall untersucht (Bericht IB Zauner).





Abb 9: Abnehmen der 1. Lamellenschicht Abb 10: Holzfeuchtemessung innerste Lamellenlage

Bei der elektrischen Holzfeuchtemessung vor Ort wurde an der innersten Lamellenlage (Abb. 10) eine Holzfeuchte von 16,4% gemessen (Bericht IB Zauner).

Zur Holzfeuchtebestimmung mittels gravimetrischer Methode und für die Darstellung der Feuchteverteilung über den das Element in Form von Schichtproben durch die FH Salzburg wurde ein weiterer Probekörper mit den Abmessungen von ca. 30x30 cm entnommen (Abb. 11). Die Durchführung der Feuchtebestimmung erfolgte durch die FH-Salzburg in den Labors am Campus Kuchl des Studiengangs Holztechnologie & Holzbau.



Abb 11: Probenkörperentnahme für Schichtproben

2. Holzfeuchtebestimmung

• Erste Probennahme am 24.05.2018:

Die Bestimmung der Holzfeuchte mittels gravimetrischer Methode (Darrmethode) erfolgte im Labor am Campus Kuchl der FH Salzburg. Die Proben wurden unmittelbar nach der Entnahme am 24.05.2018, um 0830 Uhr in Alufolie eingeschlagen, um eine Abtrocknung zu behindern und wurden ca. 2 Stunden (zwischen 1020 und 1040 Uhr) nach der Entnahme für die Feuchtebestimmung zugeschnitten, gewogen und in den Darrofen verbracht.

Das Holzbauteil, aus dem die Proben entnommen wurden, ist 4-schichtig aufgebaut. Der Probekörper wurde in einem Bereich ohne Holzdübel entnommen. Um einen besseren Überblick über die Feuchteverteilung über den Querschnitt des Probenkörpers zu erhalten, wurden die beiden relevanten inneren, dem Beton zugewandten Lagen zusätzlich in Schichten wie folgt aufgetrennt (Abb. 12: von oben nach unten):

Schicht I = innerste Schicht, dem Beton zugewandt - über die Dicke in 3 Teile geteilt
Schicht M1 = direkt darauffolgende Schicht - über die Dicke in zwei Teile geteilt
Schicht M2 = direkt darauffolgende Schicht - über die Dicke nicht weiter geteilt, die vorhandene Materialfuge trennt die Probe diagonal in zwei Teile

Schicht A = äußerste Schicht, Grenze zur Wärmedämmung, über die Dicke nicht weiter unterteilt.





Abbildung 12: Lage der Darrproben (Stapel I5) im entnommenen Probekörper und Schichtung für die Bestimmung der Feuchteverteilung

Die Ermittlung der Darrmasse der Proben erfolgte am 30.05.2018 um 0900 Uhr. Dazu wurden die Proben nach der Entnahme aus dem Darrschrank in einem Exsikkator über einem Trocknungsmittel (Silikagel) auf Raumtemperatur abgekühlt und anschließend mittels Laborwaage auf 0,001 Gramm genau gewogen.

Folgende Holzfeuchten wurde ermittelt:

Schicht im				Holzfeuchte	Mittelwert
Bauteil	Probe	m _u (g)	m ₀ (g)	u (%)	u (%)
	Schicht - I ₁₅	17,708	15,288	15,83	16,66
Lamelle I	Schicht - I_{M5}	11,090	9,400	17,98	
	Schicht - I_{A5}	10,153	8,74	16,17	
Lamelle M1	Schicht - M1 ₁₅	15,017	13,01	15,43	14,77
	Schicht - M1 _{A5}	13,693	11,999	14,12	
Lamelle M2	M2 ₅	11,825	10,548	12,11	12,09
	M2 ₅	14,387	12,836	12,08	
Lamelle A	A ₅	31,909	28,846	10,62	10,62

Tabelle 1: Holzfeuchteverteilung über die Schichten des Probekörpers vom 24.05.2018

Die maximale Holzfeuchte in Schicht I, die während des Verfüllens in direktem Kontakt mit dem flüssigen Beton stand, beträgt aktuell 17,98 %, der Mittelwert von Schicht I beträgt 16,66 %. Die Schicht M1, die nur mehr über Fugen zwischen den Lamellen der Schicht I in Kontakt mit dem Betonwasser kam (System Thoma ohne Verklebung der einzelnen Schichten und Schmalseiten) weist im, dem Beton zugewandten Bereich eine Holzfeuchte von 15,43 % und eine mittlere Holzfeuchte von 14,77 % auf. Dies deutet auf eine Wasseraufnahme während des Verfüllens mit Beton hin. Die Schicht M2 hingegen liegt mit einer Holzfeuchte von 12,09 % im Feuchtebereich des verbauten Holzes und dürfte keine signifikante Feuchteaufnahme während während des Verfüllens erfahren haben.

Nachfolgend ist die Feuchteverteilung als Diagramm dargestellt. Die für den Befall durch holzzerstörende kritische Mindestfeuchte ist als roter Bereich markiert. Die zulässige Materialfeuchte zum Zeitpunkt des Einbaus der Holzelemente vor dem Vergießen mit Beton ist als grüner Bereich dargestellt.



Abbildung 13: Feuchteverteilung über den am 24.05.2018 entnommen Probeköper rot = kritischer Feuchtebereich, grün = Einbaufeuchtebereich

Zur Feuchteverteilung der innersten Schicht ist anzumerken, dass hier gut die bereits beginnende Rücktrocknung der innersten Schicht im Bereich des Verfüllbetons erkennbar ist, die höchste Feuchte liegt im Kernbereich der inneren Lamelle, die Oberflächenbereiche begannen bereits nach einer Heizperiode abzutrocknen (Abb. 14).

Dies lässt den Schluss zu, dass das Holz die beim Verfüllen aufgenommene Feuchtigkeit während der Nutzung nach innen zum Verfüllmaterial als auch nach außen zu den angrenzenden Holzschichten abgeben kann und die Bedingungen im verbauten Zustand nicht auf dauerhaft hohe Holzfeuchten hinweisen, was im Sinne des Holzschutzes die Dauerhaftigkeit des Holz 100 Elementes nicht benachteiligt. Schicht II5





• Probennahme am 04.06.2018:

Der Probenkörper (ca. 30x30 cm) wurde nach der Entnahme in einen Kunststoffsack eingepackt und nach der Entnahme in die Labors nach Kuchl verbracht und dort umgehend für die Bestimmung der Holzfeuchte zugeschnitten, gewogen und in den Darrschrank eingebracht. Die Verweildauer im Kunststoffsack betrug auf Grund der Arbeiten auf der Baustelle ca. 5 Stunden, die Verpackung erfolgte um 0930 Uhr, die Entnahme und Verarbeitung erfolgte um 1445 Uhr.

Das Holzbauteil, aus dem die Proben entnommen wurden, ist 4-schichtig aufgebaut. Der Probekörper wurde in einem Bereich ohne Holzdübel entnommen. Um einen besseren Überblick über die Feuchteverteilung über die Dicke des Probenkörpers zu erhalten, wurden die beiden relevanten inneren, dem Beton zugewandten Lagen zusätzlich in Schichten wie folgt aufgetrennt (Abb. 15: von oben nach unten):

Schicht I = innerste Schicht, dem Beton zugewandt - über die Dicke in 3 Teile geteilt
 Schicht M1 = direkt darauffolgende Schicht - über die Dicke in zwei Teile geteilt
 Schicht M2 = direkt darauffolgende Schicht - über die Dicke nicht weiter geteilt, die vorhandene Materialfuge trennt die Probe diagonal in zwei Teile

Schicht A = äußerste Schicht, Grenze zur Wärmedämmung, über die Dicke nicht weiter unterteilt.





Abbildung 15: Schichtung des Probekörpers für die Bestimmung der Feuchteverteilung

Zusätzlich wurde noch ein Buchendübel entnommen, der im Verfüllmörtel mit eingegossen gewesen war. Es wurde die Feuchteverteilung über die Länge (Lage des Dübels im Holz 100 Element, bzw. Auskragung in den Verfüllmörtel) bestimmt, um den Einfluss der Feuchteaufnahme, bzw. der Feuchteabgabe darstellen zu können (Abb. 16, rote Linien = Bereich des Holz 100 Elements).

Folgende Holzfeuchten wurden ermittelt:

Schicht im				Holzfeuchte	Mittelwert
Bauteil	Probe	m _u (g)	m₀ (g)	u (%)	u (%)
	Schicht - I	15,026	12,766	17,70	16,15
Lamelle I	Schicht -I _M	16,924	14,551	16,31	
	Schicht -I _A	17,203	15,033	14,43	
Lamelle M1	Schicht -M	21,391	18,960	12,82	12,52
	Schicht -M _A	23,049	20,538	12,23	
Lamelle M2	MA1	11,918	10,720	11,18	11,23
	MA2	16,680	14,988	11,29	
Lamelle A	A	38,322	34,568	10,86	10,86

Tabelle 2: Holzfeuchteverteilung über die Schichten des Probekörpers vom 04.06.2018

Bei dieser Probe war der bestimmte Feuchtegehalt insgesamt ebenfalls unkritisch (Tabelle 2), im Unterschied zu der Messung der ersten Proben, ist die innerste Schicht nicht nach innen zum Verfüllbeton abgetrocknet, sondern die innerste Schicht weist die höchste Holzfeuchte auf. Es besteht ein Feuchtegefälle von innen nach sowohl über den Querschnitt der innersten Lamelle als auch der nachfolgenden Lamelle, die ebenfalls über die Materialfugen einer Feuchtebelastung während des Verfüllens ausgesetzt war. Bei dieser Probe konnte die innerste Schicht der inneren Lamelle konnte nicht im gleichem Maße abtrocknen wie die innerste Schicht der inneren Lamelle bei der ersten Probe (vergleiche Abb. 14 und Abb. 18). Nachfolgend ist die mittlere Feuchteverteilung über die Schichten des das Holz 100 Elements

als Diagramm dargestellt. Die für den Befall durch holzzerstörende Pilze kritische Mindestfeuchte ist als roter Bereich markiert. Die zulässige Materialfeuchte zum Zeitpunkt des Einbaus der Holzelemente vor dem Vergießen mit Beton ist als grüner Bereich dargestellt.



Abbildung 17: Feuchteverteilung über den Querschnitt des Holz 100 Elements vom 04.06.2018 rot = kritische Feuchte für Pilzbefall, grün = Einbaufeuchtebereich



Bei der Betrachtung der innersten Schicht ergibt sich folgende Feuchteverteilung:

Abbildung 18: Feuchteverteilung der innersten Lamelle des Holz 100 Elements vom 04.06.2018 rot = kritische Feuchte für Pilzbefall, grün = Einbaufeuchtebereich

Das Ergebnis der Darrmethode und der elektrischen Messung vor Ort korrelieren sehr gut (16,15 % im Labor versus 16,4 % vor Ort).

Die Feuchteverteilung über den entnommen Buchendübel ergibt ein ähnliches Bild wie die Feuchteverteilung über das Holz 100 Element, ausgenommen der Zone D_B der direkt vom Verfüllbeton umschlossen war und deshalb während des Verfüllens deutlich mehr Feuchte aufnehmen konnte (auch bedingt durch die Holzart – Buche – die Feuchte sehr rasch aufnimmt) und die durch Einschluss im Verfüllbeton nur langsam abtrocknen kann (Abb. 19). In den Zonen im Bereich des Holz 100 Elements (Zonen D_I, D_M, D_A) ist keine kritische Holzfeuchte (mehr) vorhanden.



Abbildung 19: Feuchteverteilung Buchendübel vom 04.06.2018, Schicht 1 im Verfüllbeton, Schicht 2 - 4 im Holz rot = kritische Feuchte für Pilzbefall, grün = Einbaufeuchtebereich

3. pH-Wert Messung

Zusätzlich zur Feuchtebestimmung erfolgte eine Messung der pH-Werte einzelner Schichten, um einen zusätzlichen Parameter für die Abschätzung eines Befallsrisikos durch Pilze zu ermitteln.

Die Holzgrenzschicht zum Beton ergab einen pH-Wert von 10 und ist deshalb als basisch einzustufen. Laut Schmidt (2006) begünstigt ein pH-Wert zwischen 4 und 6 eine Keimung von unterschiedlichen Holzpilzen. Basierend auf diesen Ergebnissen ist eine Keimung von Holzpilzen, die unter normalen Bedingungen während der Verarbeitung dieser Holzprodukte an der Oberfläche haften können, nicht günstig.

Tabelle 2: pH-Werte

Probenbezeichnung	Beschreibung	pH-Wert nach 1 Stunde)*
Osmosewasser	Referenz	6,32
Beton	Probe auf Oberfläche	10,89
i5i	Grenzschicht zum Beton	10,00
і5а	5 mm hinter der Grenzschicht zum Beton	6,27
5a	aHolz100 im Außenbereich	5,81
	Literaturwert aus Fengel und Wegener (2003)	5,30

)* Die Bestimmung des pH-Wertes erfolgte in Anlehnung an die Methode von Sandermann und Rothkamm (1959). Die Ionenkonzentration der jeweiligen Lösung wurde nach einer Stunde gemessen.

4. Beschichtungsversuche

Es wurde ein Beschichtungssystem auf Empfehlung der Fa. Velox ausgewählt (Info von DI Bleckmann, Büro Schweizer, Email vom 01.08.2018).

https://www.avenariusagro.at/produkt/fassaden-und-wandbeschichtungen/aussenfarben/disbocret-elastic

Auftrag der Beschichtung in folgender Reihenfolge:

- 1) Farbloser Tiefengrund W (Avenarius Agro) Auftrag mittels Pinsel
- 2) Erster Auftrag Discocreit Elastic (Avenarius Agro) weiß mittels Pinsel
- 3) Zweiter Auftrag Discocreit Elastic (Avenarius Agro) weiß mittels Pinsel



Abbildung 20: Unterschied vor und nach dem ersten Auftrag der Beschichtung

Die angedachte Applikationsmethode "Spritzen" konnte bei der vorliegenden Viskosität der Beschichtung mit den zur Verfügung stehenden Mitteln nicht durchgeführt werden. Eine deutliche farbliche Veränderung der Materialoberfläche konnte nach dem ersten Auftrag der Beschichtung festgestellt werden (Abb. 20). Teilweise wurden die vorhandenen Poren bereits bei der ersten Anstrich gefüllt.



Abbildung 21: Oberflächenbeschaffenheit nach dem zweiten Anstrich

Diese Füllung der Poren wird nach dem zweiten Anstrich noch deutlich erkennbarer (Abb. 21) und es entsteht eine geschlossene Oberfläche in diesem Bereich.

Nach Besichtigung der hergestellten Musteroberflächen mit einem oder zwei deckenden Anstrichen am Montag, 15.10.2018 durch DI Bleckmann, DI Embacher und Arch. Schweizer vom Büro Schweizer wurde aufgrund der haptischen Eigenschaften der Oberflächen und des ästhetischen Eindrucks (Porenfüllung und "Kunststoffoberfläche") die weitere Verwendung bzw. weitere Untersuchungen mit diesem Beschichtungstyp eingestellt.

5. Quellen

Sandermann W, Rothkamm M (1959) Über die Bestimmung der pH-Werte von Handelshölzern und der en Bedeutung für die Praxis. Holz Roh Werkst 17:433-444

Schmidt O (2006) Wood and Tree Fungi – Biology, Damage, Protection, and Use. Springer Berlin Heidelberg New York

ÖNORM EN 13183 Teil 1 (2004) Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz, Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren. Österreichisches Normungsinstitut Wien

ÖNORM EN 13183 Teil 2 (2004) Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz, Teil 2: Schätzung durch elektrisches Widerstands-Verfahren. Österreichisches Normungsinstitut Wien

Zusammenfassung der Ergebnisse

Thermische und hygrische Untersuchung

Das Modell weist eine ausreichende thermische Funktionalität auf. Während der Kälteperiode von 25.02.2018 bis 03.03.2018, in der auch die Norm-Außentemperatur von -13,2 °C (lt. OIB RL 6) unterschritten wurde, konnte das System den Messraum konstant auf einem behaglichen Temperaturniveau halten. Demnach erwies sich die Regelung nach Außentemperatur als funktionstüchtig.

Der Wärmestrom vom Rohr über das Bestandsmauerwerk in den Innenraum funktioniert. Ausschlaggebend dafür ist der Wärmeübergangskoeffizient der Verrohrung, sowie die Herstellung eines gut wärmeleitenden Verbunds zum Bestandsmauerwerk durch den Verfüllmörtel. Verluste nach außen durch das Fassadenelement müssen allerdings in Kauf genommen werden, können jedoch durch eine adäquate Wärmedämmung minimiert werden. Aufgrund der niedrigen Vorlauftemperaturen der Bauteilaktivierung eignet sich das Heizsystem auch für Wärmepumpen, welche auf niedrigem Temperaturniveau eine erhöhte Effizienz aufweisen.

Die Temperaturspreizung zwischen Vor- und Rücklauf ist mit 0,45 K im mittel sehr gering. Die Vorlauftemperatur betrug während der Messdauer im Mittel 31,85 °C. Fußbodenheizungen weisen im Vergleich dazu ein Delta von rund 4 bis 5°C und höher auf. Der Massenstrom ist mit einer Geschwindigkeit von 0,69 m/s zu hoch. Dieser sollte 0,50 m/s nicht überschreiten. Ziel für eine weiterentwickelte Regelung sollte es daher sein, die Temperaturspreizung zu erhöhen und den Massenstrom zu mindern. Mögliche Lösungsansätze dafür sind das Vermindern des Verlegeabstandes bzw. das Erhöhen der Vorlauftemperatur.

Durch den Abgleich mit den Messwerten konnte ein validiertes Simulationsmodell geschaffen werden. Hierbei stand die thermische und hygrische Funktionalität im Vordergrund.

Mittels der Software IDA-ICE konnte, basierend auf den Randbedingungen der Messung, ein thermisch validiertes Modell gebildet werden.

Die Simulation mit der Software Wufi Pro ergab einen, gegenüber den tatsächlich gemessenen Werten im Prototypen, langsameren Austrocknungsprozess. Eine mögliche Erklärung dafür sind Lufteinschlüsse im verdübelten Brettsperrholz, die in der Simulation nicht berücksichtigt werden konnten. Bei der Anwendung der Validierung für weitere Untersuchungen liegt man also auf der sicheren Seite.

Mithilfe des Modells werden im Forschungsprojekt "Smart City Hallein - Wohnen findet Stadt!" die Wandheizungselemente und der Bauteilaufbau weiterentwickelt und deren Regelalgorithmen angepasst sowie die Validierungsmodelle verbessert.

Schalltechnische Untersuchung

Die Messungen spiegeln sehr stark wieder, dass Fassadensysteme, die aufgrund ihrer Oberflächenstruktur eine große Oberfläche haben, hohe Absorptionsgrade aufweisen.

Die am stärksten absorbierenden Varianten waren die Konstruktionen mit der Fassadenplatte Velox "Rille". Diese Varianten unterscheiden sich noch durch die Tiefe des Hohlraumes hinter der Platte. Dieser beeinflusst die Position eines Peaks im niedrigen Frequenzbereich. Dadurch haben Konstruktionen mit geringerer Hohlraumtiefe bessere Werte erzielt, da der Peak dadurch in höhere Frequenzbereiche gefallen ist, die in den Einzahlwerten stärker gewichtet werden.

Die zweitbesten Ergebnisse hat die Konstruktion mit aufgestellten Holzelementen erzielt. Deren Verhalten ist stark geprägt von einem Helmholtz-Resonanz-Effekt um 600 Hz. Jedoch auch abseits der Helmholzresonanzfrequenz zeigt diese Konstruktion einen hohen Absorptionsgrad. Dieser ist vermutlich auf die große Oberfläche zurückzuführen, die durch die aufgestellten Holzelemente zustande kommt.

Die Varianten des Produktes "Baumrinde" weisen zwar einen hohen Absorptionsgrad auf. Dieser ist jedoch deutlich niedriger als jener des Produktes "Rille". Dies liegt vermutlich an der geringeren Oberfläche, dieses Produktes.

Die anfängliche Vermutung, dass sich die Velox Produkte wie poröse Absorber verhalten würden hat sich nicht bestätigt. Es legt jedoch das Auftreten der Peaks im niedrigen Frequenzbereich, deren Lage von der Tiefe des Hohlraums abhängig ist, nahe, dass diese Fassadenplatten als Lochplatten (mit Löchern und Schlitzen von wenigen Millimetern Durchmesser) modelliert werden können, und die Peaks aufgrund von Helmholtz-Resonanz-Effekten auftreten. Sollte sich diese Vermutung bestätigen, so könnte dieser Effekt insbesondere beim Produkt "Rille" dazu genutzt werden, durch Variation der Tiefe des Hohlraumes im Bereich zwischen 100 Hz und 700 Hz einen maßgeschneiderten Peak zu erzeugen. Um dies zu bestätigen oder zu widerlegen wären jedoch weitere Messungen erforderlich.

Die Helmholtzabsorber haben nur dann eine starke Absorption bei der Resonanzfrequenz gezeigt, wenn sie einen hohen Loch-/bzw. Schlitzanteil von über 10 % aufwiesen. Bei Absorbern mit Loch-/Schlitzanteil von 1-2% konnten keine hohen Absorptionswerte bei der Resonanzfrequenz erzielt werden.

Aufgrund des hohen Absorptionsgrades ist das Produkt "Rille" mit möglichst geringer Hohlraumtiefe (Messung 11) am besten geeignet, um den gesamt-Schallpegel im Außenraum neben einer befahrenen Straße zu reduzieren. Dies lässt sich am besten am Kennwert DL_{α} ablesen, der mit einer Gewichtung eines A-bewerteten Verkehrslärmspektrums versehen ist. Soll ein System gewählt werden, das keine Holzspanbetonoberfläche aufweist, so ist die Konstruktion mit aufgestellten Holzelementen (Messung 18) jene, die die besten Absorptionseigenschaften aufweist.

Holzfeuchte-pH-Wert-Besichtungsversuche

Die Bestimmung der Holzfeuchtigkeit über den Schichtaufbau des Holzkörpers ergab, dass die inneren beiden Schichten während des Einbringens des Betons Feuchtigkeit aufnehmen, diese aber bereits nach einer Heizperiode abtrocknen konnten. Die Holzfeuchtigkeit der beiden Messstellen liegen bereits nach 4 Monaten Heizperiode im unkritischen Bereich hinsichtlich eines Befalls durch holzzerstörende Pilze. Zusätzlich wird durch den stark basischen pH-Wert des Betons das Risiko für einen Pilzbefall weiter reduziert.

Das ursprünglich angedachte Beschichtungsmaterial für die Fassadenplatten entsprach nicht den Erwartungen der Planer. Die Verwendung dieses Produktes wird nicht weiterverfolgt.



